



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRAÚDO DE
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Anna Laura Dalmolin Beneduzi

Lajeado, dezembro de 2020

Anna Laura Dalmolin Beneduzi

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRAÚDO DE
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof Me. Rafael Mascolo

Lajeado, dezembro de 2020

Anna Laura Dalmolin Beneduzi

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO GRAÚDO DE
RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil:

Prof. Me. Rafael Mascolo – orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Carolina Becker Porto Fransozi
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Helena Batista Leon
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 03 de dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço à meus pais, Ricardo e Ivânia, pelo apoio e incentivo incondicional na busca dos meus objetivos e na realização dos meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador, Me. Rafael Mascolo, pelos conhecimentos e disposição dedicada ao aprimoramento deste trabalho, além de ser um exemplo de professor durante a minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos funcionários do LATEC, pela disponibilidade e auxílio nas atividades práticas deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas, por compartilharem comigo bons momentos e experiências ao longo desses anos.

Por fim, agradeço à todos os professores pelo carinho e esforço em transmitir seus conhecimentos que com certeza contribuíram com o meu crescimento profissional.

RESUMO

A construção civil é o setor que mais gera resíduos no mundo, entre eles os produzidos em construções e demolições. Com o passar dos anos, técnicas vêm sendo implementadas na reciclagem desses materiais, a fim de reduzir os impactos ambientais. O concreto, por exemplo, pode passar por um processo de britagem e substituir os agregados graúdos naturais (AGN) em novas misturas de concreto, porém, em todas as aplicações, ensaios devem ser realizados para validar a aplicabilidade. Essa monografia tem como objetivo avaliar a influência de agregados reciclados de concreto nas propriedades físicas e mecânicas de novos concretos. Para isso, foi construída curva de dosagem através do método IPT/EPUSP, com três traços referências, um rico (1:3,5), um intermediário (1:5,0) e um pobre (1:6,5). A partir da curva de dosagem, definiu-se dois traços para resistências características de 25 MPa e 30 MPa, e para cada uma delas foram desenvolvidos traço sem substituição (TRRF), com 50% de substituição (TR50) e 100% de substituição (TR100) do AGN pelo agregado gráudo reciclado de concreto (AGRC), totalizando seis traços. Antes das misturas foram realizados ensaios de caracterização do cimento, da areia média, do AGN e do AGRC, com o intuito de determinar as propriedades dos materiais e, principalmente, para avaliar as diferenças entre os agregados graúdos. Entre essas propriedades, o aumento da taxa de absorção do AGRC pôde ser corrigido através do método de pré-molhagem, e a menor massa específica do mesmo influenciou no aumento da massa de agregado reciclado utilizado nas misturas com substituição. Para moldagem dos traços, definiu-se a relação a/c e o abatimento como constantes, sendo a fluidez da mistura corrigida com aditivo plastificante, quando necessário. Os traços de concreto foram avaliados quanto a ensaios de massa específica, de resistência à compressão axial, de absorção e índice de vazios, de absorção de água por capilaridade e de módulo de elasticidade. Os resultados podem ser resumidos em aumento do *slump*, das taxas de absorção e do índice de vazios, e redução na massa específica, na resistência à compressão e no módulo de elasticidade conforme o aumento do teor de substituição dos traços. Os maiores influenciadores foram o aumento da porosidade e das zonas de transição presentes nos AGRC quando comparados aos AGN. Ainda que com variações nos resultados, as propriedades dos AGRC tornam este material viável na produção de novos concretos convencionais pois apresentaram resultados satisfatórios no estado fresco e endurecido.

Palavras-chave: Resíduos de construção. Agregado gráudo reciclado. Concreto.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Problema de pesquisa	8
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo geral	8
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Delimitação da pesquisa	9
1.4 Justificativa da pesquisa	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Sustentabilidade na Engenharia Civil	11
2.1.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	11
2.1.1.1 Classificação dos resíduos	12
2.1.1.2 Gerenciamento de resíduos	13
2.1.1.3 Normas sobre RCD	14
2.1.2 Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC)	14
2.1.2.1 Composição granulométrica	16
2.1.2.2 Massa unitária e massa específica	17
2.1.2.3 Absorção de água	18
2.1.3 Concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto	19
2.1.3.1 Propriedades físicas	20
2.1.3.1.1 Massa específica	20
2.1.3.1.2 Consistência	21
2.1.3.1.3 Absorção	22
2.1.3.2 Propriedades mecânicas	23
2.1.3.2.1 Resistência à compressão axial	23
2.1.3.2.2 Módulo de elasticidade	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	28

3.1 Caracterização dos Materiais	28
3.1.1 Cimento	28
3.1.2 Agregado Miúdo	29
3.1.3 Agregado graúdo natural	30
3.1.4 Agregado graúdo reciclado	32
3.1.4.1 Coleta das amostras	32
3.1.4.2 Ensaios de caracterização	33
3.1.5 Água de amassamento	35
3.2 Métodos	36
3.2.1 Determinação dos traços	36
3.2.2 Produção dos concretos e moldagem dos corpos-de-prova	39
3.2.3 Ensaio de consistência (Abatimento de tronco de cone)	40
3.2.4 Ensaio de Massa específica do concreto	40
3.2.5 Ensaio de compressão axial	40
3.2.6 Ensaio de absorção e índice de vazios	41
3.2.7 Ensaio de absorção de água por capilaridade	42
3.2.8 Ensaio de Módulo de elasticidade	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Concreto fresco	45
4.1.1 Consistência	45
4.1.2 Massa específica	47
4.2 Concreto endurecido	48
4.2.1 Resistência à Compressão axial	48
4.2.2 Absorção e índice de vazios	51
4.2.3 Absorção de água por capilaridade	55
4.2.4 Módulo de elasticidade	60
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A construção civil tem grande contribuição para o crescimento econômico do país, produzindo e consumindo insumos e gerando empregos. Em contrapartida, no século XXI o grande desafio é conciliar evolução econômica com preservação ambiental. O aumento da população e a urbanização das cidades resultaram no aumento da geração de resíduos de construção civil que, com o tempo, passou a ser a maior parte dos resíduos gerados diariamente no mundo.

Os resíduos gerados na construção civil não se limitam apenas àqueles de novas obras, mas também por demolições. Com base na Resolução CONAMA nº 307 (2002), os municípios devem possuir seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, cessando a formação de resíduos em aterros domiciliares e em áreas de “bota fora”, sendo que o principal objetivo é a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução e reutilização.

A fim de minimizar esses impactos e investir em inovação, técnicas de reaproveitamento de materiais, que há anos estavam sendo aplicadas, foram aperfeiçoadas, principalmente com cerâmica, vidro, argamassa e concreto. O beneficiamento e reutilização de insumos que ainda são considerados entulhos, garantindo e atingindo propriedades similares aos materiais originais, são muito válidos, principalmente para o meio ambiente.

As propriedades do concreto dependem muito das características do agregado gráudo constituinte. A principal influenciadora da resistência, da

durabilidade e da permeabilidade do concreto é a porosidade, sendo que na estrutura do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), a argamassa aderida ao mesmo lhe confere maior porosidade. Outros fatores como a forma e a dimensão do agregado, a origem e a resistência do concreto original também influenciam nas propriedades físicas e mecânicas do concreto (CARRIJO, 2005).

O objetivo principal deste trabalho é avaliar e comparar as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com e sem AGRC. Para determinar as propriedades dos materiais componentes das misturas de concretos é necessário realizar ensaios seguindo as normas vigentes, como os de resistência mecânica, de consistência, de absorção, de módulo de elasticidade, entre outros. Apesar de várias pesquisas apresentarem resultados positivos do concreto produzido com AGRC e comprovarem sua viabilidade de utilização, estes ainda não são utilizados com prioridade nas obras, pois cada material possui uma origem, aplicação e conseqüentemente propriedades diferentes. A mesma amostra de AGRC, por possuir uma composição heterogênea, pode apresentar resultados distintos, ou seja, para cada mistura de concreto seriam necessários ensaios para avaliar sua aplicabilidade. Dessa forma, essa discussão faz questionar se a reutilização de concretos na produção de novos concretos é viável.

1.1 Problema de pesquisa

Qual a viabilidade técnica da utilização de agregado reciclado de concreto na produção de concretos convencionais?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concretos com substituição parcial e total de agregado natural por agregado reciclado.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. avaliar as propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados de concreto;
- b. analisar a influência do agregado reciclado nas propriedades físicas do concreto no estado fresco e endurecido;
- c. qualificar a influência do agregado reciclado nas propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido;
- d. comparar as propriedades físicas e mecânicas entre classes de resistência de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto.

1.3 Delimitação da pesquisa

A pesquisa limitou-se a utilizar um único método de dosagem para concretos convencionais com os materiais de construção disponíveis na região. Utilizou-se agregado reciclado proveniente da demolição de estruturas de uma única empresa na cidade de Encantado/RS com o mesmo intervalo de resistência característica (F_{ck}).

1.4 Justificativa da pesquisa

Os problemas ambientais são discutidos em diversos setores da sociedade, sendo que pessoas e empresas vêm sendo obrigadas a alterar formas de produção e buscar novas alternativas visando reduzir esses impactos. Lovato (2007) explicita que o ramo da construção civil ainda é o maior gerador de resíduos sólidos, podendo chegar a 50% do total de resíduos produzidos no mundo. De certa forma, é inevitável o acúmulo de resíduos de construção e demolição, principalmente em países que visam o desenvolvimento. Gonçalves (2001) cita que países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos, chegam a movimentar milhões de dólares por ano no comércio de resíduos de concreto, isso porque este material possui um

grande potencial de reutilização devido às suas características como resistência e idade e por seu grau de contaminação ser muito pequeno.

Por isso, as alternativas mais discutidas para diminuir entulhos e amenizar impactos ambientais são estudar a viabilidade de reciclar e reutilizar resíduos sólidos de construção civil, garantindo propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Como a reciclagem e reutilização desses resíduos ainda é uma prática muito recente, Gonçalves (2001) comenta que deve-se ter cautela na substituição dos materiais convencionais pelos reciclados, pois é necessário conhecê-los inteiramente para ter domínio das suas propriedades.

Sendo assim, o trabalho remete à necessidade de conhecer as propriedades dos resíduos gerados na região para tornar viável sua utilização na produção de novos materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre o tema estudado, aspectos pertinentes e diferentes interpretações publicadas em referenciais bibliográficos.

2.1 Sustentabilidade na Engenharia Civil

O Brasil é considerado um país emergente, e isso se deve ao desenvolvimento de diversas áreas, principalmente da construção civil. Cordeiro (2013) exemplifica que eventos como a Copa do Mundo de 2014 e as Olimpíadas de 2016 no Brasil serviram como impulso, fazendo com que as obras e reformas se intensificassem. Contudo, as construções, demolições e reformas exigem muitos recursos naturais, e apesar do Brasil ser um exemplo de abundância desses recursos, o uso desenfreado se tornou pauta para amplificação de novas alternativas.

2.1.1 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Segundo a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), entende-se como resíduo da construção civil todos os entulhos de obra, reforma e demolição, ou procedentes de escavação de terreno, como concreto, rochas, argamassa, tijolos, blocos cerâmicos, telhas, metais, madeiras e compensados, tintas, resinas, gesso, vidros, plásticos, pavimentos asfálticos, tubulações e fiação elétrica.

Os resíduos gerados em construções são perdas devido a problemas na construção ou quantidades superestimadas de materiais, como o concreto. Os

resíduos de reformas são, normalmente, concreto e tijolos provenientes de demolições, porém, em menor quantidade estão também vidros, plásticos, aço, madeira, e em alguns casos possuem substâncias tóxicas, como fenóis, metais pesados e sulfatos (LOVATO, 2007).

Em sua tese, Angulo (2005) mostra que os resíduos de construção e demolição (RCD) gerados nas construções informais e canteiros de obras nos meios urbanos são cerca de 2 a 3 vezes maior que a massa de lixo, e que correspondem a até 67% da massa de resíduos sólidos urbanos. A grande problemática é que essas grandes massas são depositadas de forma ilegal dentro da cidade, o que resulta em impactos ambientais e custos de transporte e deposição dos resíduos em aterros. Para reduzir essas deposições ilegais, a utilização de aterros, o consumo de insumos não-renováveis e, conseqüentemente, os impactos ambientais, estratégias são tomadas para reciclar e reutilizar os resíduos.

Segundo Leite (2001), existem registros de que alvenaria britada já era usada na produção de concreto pelos romanos, e que desde 1928 são realizados estudos para avaliar a influência da utilização de tijolos britados no consumo de cimento, de água e na granulometria dos agregados. Entretanto, os primeiros aproveitamentos significativos de resíduos de construção e demolição foram na época da Segunda Grande Guerra, devido aos grandes volumes de escombros espalhados.

2.1.1.1 Classificação dos resíduos

Os resíduos da construção civil podem ser classificados em Classe A, B, C e D. De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (2002), os de classe A são os possíveis de serem recicláveis e reutilizáveis na própria construção civil, como agregados, solo, argamassa, concreto, tijolos, blocos cerâmicos, telhas e tubos. Os de Classe B também são recicláveis, porém com outras destinações, como plástico, vidro, metais, papel/papelão e madeiras. Já os de Classe C, como o gesso, não possuem ainda viabilidade econômica ou tecnologias eficientes de reutilização. A atual Resolução nº 348 (CONAMA, 2004), define os resíduos de Classe D como

perigosos e prejudiciais à saúde, como tintas, solventes, óleos, ou contaminados que contenham amianto ou outros componentes nocivos.

A NBR 10004 (ABNT, 2004a), classifica os resíduos em classe I, como perigosos, e classe II, como não perigosos, sendo que esses podem ser não inertes ou inertes, diferenciados pela subclassificação A ou B. Os resíduos de construção civil estão inseridos na classificação II B - Resíduos inertes, que são definidos como:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004, p. 5).

2.1.1.2 Gerenciamento de resíduos

Definido pela Resolução do CONAMA nº 307 (2002), o gerenciamento de resíduos é realizado por meio de ações que, juntamente com um planejamento adequado, procedimentos, recursos e responsabilidades, objetivam reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos. Em teoria, é prioritário a não geração de resíduos, porém, como não é a realidade, a destinação correta é muito importante. Os materiais não podem ser misturados com resíduos domiciliares, nem depositados em áreas de bota fora, em corpos d'água ou em lotes vazios, sendo que o correto destino varia de acordo com a sua classificação. Os resíduos de Classe A devem ser reciclados ou destinados a aterros de resíduos da construção civil, os de Classe B devem ser reciclados ou armazenados em locais temporários, e a destinação dos de Classe C e D devem atender normas técnicas específicas.

Em países de primeiro mundo como o Japão, as construtoras são obrigadas a contemplar em seus projetos um plano de destinação dos resíduos gerados nas obras, e para que o sistema seja eficiente, o poder público deve oferecer um local para armazenamento e alternativas de reaproveitamento dos materiais (GONÇALVES, 2001).

2.1.1.3 Normas sobre RCD

Como qualquer estudo, projeto ou execução, para movimentar, depositar ou reutilizar resíduos da construção, é necessário seguir normas técnicas. Entre as normas específicas estão a NBR 15113 (ABNT, 2004b) e a NBR 15114 (ABNT, 2004c), que são referentes a resíduos sólidos da construção civil em geral, e a NBR 15115 (ABNT, 2004d) e a NBR 15116 (ABNT, 2004e) que são mais específicas da área de pavimentação.

A NBR 15113 (ABNT, 2004b) aborda diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros para depósito de resíduos da construção civil. Entre os itens que ela apresenta estão a classificação dos resíduos, condições de implantação, uso do terreno, projetos, memorial, cronograma e custos.

As diretrizes para as áreas de reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil são abordadas na NBR 15114 (ABNT, 2004c). O conteúdo se assemelha ao da NBR 15113 (ABNT, 2004b), porém, além disso, ela informa treinamentos, projeto, triagem, implantação, procedimentos e operação de espaços para reciclagem de resíduos.

2.1.2 Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC)

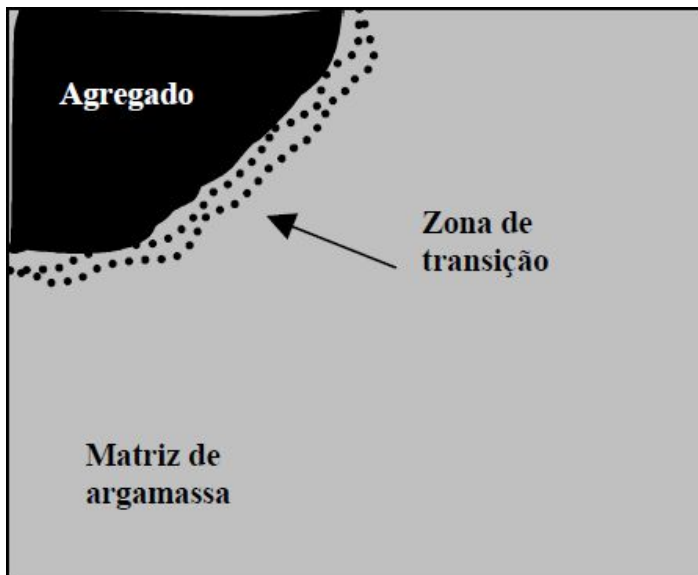
Os AGRC são resultado da britagem de concretos oriundos de construções e demolições, e que, por serem resíduos de Classe A, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004e), podem ser aplicados em novas composições de obras de engenharia. Suas propriedades dependem da origem do material e dos processos de produção.

O tipo de britador, os mecanismos de extração de impurezas e a resistência do concreto original, segundo Leite (2001), são alguns dos fatores mais determinantes das propriedades dos agregados reciclados.

Gonçalves (2001) afirma que os agregados reciclados possuem seções bastante heterogêneas, em sua maioria angular e áspera, e, assim como o concreto

endurecido, são formados por uma estrutura composta por brita, uma zona de transição e a argamassa, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do concreto



Fonte: Gonçalves (2001)

A zona de transição presente no agregado reciclado é responsável por tornar a ligação entre os componentes heterogênea, frágil e aumentar ainda mais a porosidade do material. Quando utilizado na mistura de novos concretos, há a formação de uma nova zona de transição entre o agregado e a nova argamassa, enfraquecendo ainda mais as ligações e aumentando a porosidade com relação ao concreto original (CARRIJO, 2005).

Segundo Carrijo (2005), as propriedades dos agregados influenciam diretamente nas propriedades e na vida útil do concreto. O número de poros, tamanho, volume e os mecanismos de transporte da umidade dentro do concreto dependem basicamente do fator a/c , concluindo como a porosidade o maior influenciador nos resultados de massa específica, taxa de absorção, massa unitária, resistência e módulo de elasticidade. Esse fator aumenta proporcionalmente à quantidade de argamassa aderida à brita, sendo que quanto maior a resistência do

concreto original e menor o grão do agregado, maiores as concentrações de argamassa.

Da mesma forma que nos agregados naturais, as propriedades físicas como densidade, resistência, forma, tamanho, textura e distribuição dos poros dos reciclados são mais influentes na massa unitária, no módulo de elasticidade e na estabilidade dimensional do concreto quando comparadas às propriedades químicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2.1 Composição granulométrica

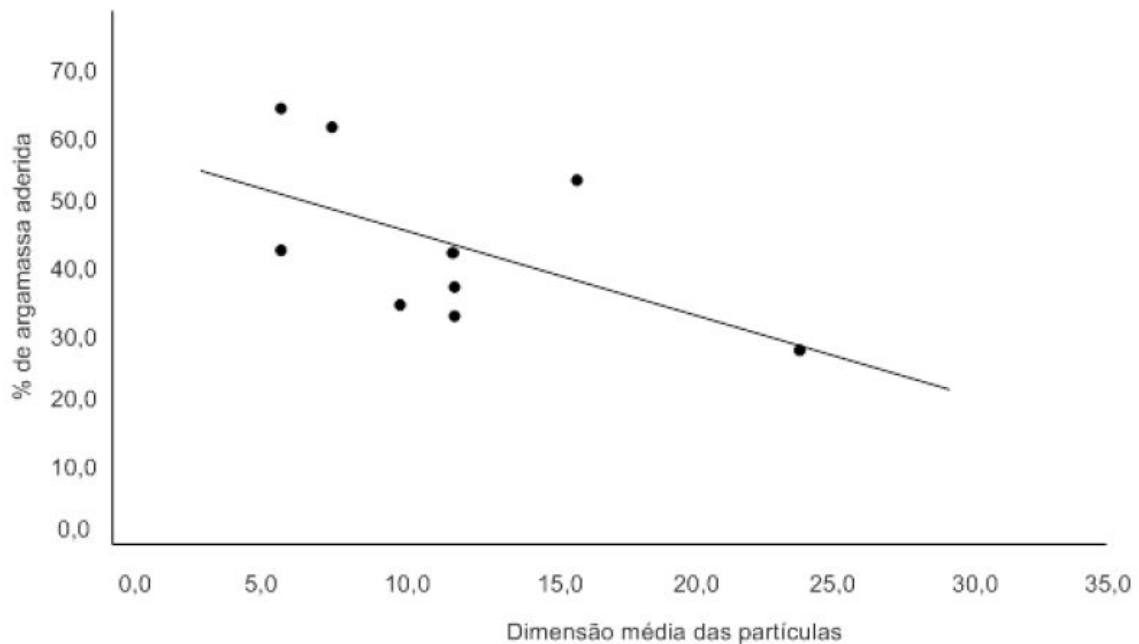
No processo de beneficiamento dos resíduos de concreto para produção dos agregados miúdos e graúdos, após a britagem dos resíduos de concreto obtém-se em torno de 50% de agregado miúdo e 50% de agregado graúdo (GONÇALVES, 2001).

Cordeiro (2013) explica que, durante o processo de britagem, desenvolvem-se finos e microfinos, cujas dimensões máximas são 4,8 mm e 0,075 mm, respectivamente. Essas partículas são argamassa aderida, que envolvem os grãos maiores de agregado, ocupando espaços vazios. Segundo estudos do autor, quanto menor o grão do agregado, maiores as concentrações de argamassa aderida. Em função disso não é recomendado utilizar agregados miúdos de concreto reciclado para produção de novos concretos.

Para Lovato (2007) não existe um consenso da melhor dimensão de agregados para concretos, porém, Leite (2001) cita que o método DOE (Department of Environment) de dosagem de concreto recomenda utilizar agregados graúdos reciclados com dimensão máxima entre 16 e 20 mm, para garantir durabilidade. Além disso, em função dos agregados reciclados de concreto terem argamassa aderida aos fragmentos, quanto maior a dimensão do agregado maior a fragilidade na ligação das novas misturas.

A Figura 2 mostra a relação que o tamanho do agregado com a quantidade de argamassa aderida à brita.

Figura 2 - Porcentagem de argamassa aderida em função da dimensão média das partículas



Fonte: Cordeiro (2013)

Em comparação aos agregados naturais, estes possuem composição granulométrica e módulo de finura (MF) maiores, e isso pode variar de acordo com o tipo de resíduo, de britador e dos processos utilizados. A granulometria do agregado deve servir de orientação apenas para a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, e quando utilizados em grandes quantidades resultam em uma necessidade maior de água para garantir a trabalhabilidade, uma vez que esse tipo de agregado é menos denso, possui uma massa específica menor e consequentemente uma maior taxa absorção (LEITE, 2001).

2.1.2.2 Massa unitária e massa específica

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) define massa unitária como a relação entre a massa de agregado lançada em um recipiente e a unidade de volume do mesmo, que considera o volume das partículas e os vazios entre elas. Devido ao superior

número de vazios dos agregados graúdos reciclados de concreto, decorrentes da argamassa aderida à brita, segundo Leite (2001), a massa unitária em comparação aos agregados graúdos naturais (AGN) pode chegar a ser 30% inferior.

A massa específica do agregado reciclado de concreto segue o mesmo raciocínio da massa unitária. Devido a grande porosidade, o material e, conseqüentemente, o concreto produzido com este agregado, possuem massa específica menor que os produzidos com agregados naturais. Este parâmetro é determinante na dosagem e no cálculo do consumo de materiais nas misturas.

Lovato (2007) exemplificou que testes com agregados graúdos reciclados saturados em superfície seca apresentaram massa específica variando entre 2,27 e 2,56 g/cm³. Os resultados de massa específica significam uma menor densidade dos AGR, que segundo Buttler (2003), pode reduzir em torno de 13%, e isso implica em uma compensação de massa de material nas dosagens por volume. A mesma massa de agregados naturais e reciclados resultam em um volume maior de AGR, uma vez que ele tem uma densidade menor e, conseqüentemente, é mais leve. Já Gonçalves (2001) cita que essa redução média pode chegar apenas a 6%.

Buttler (2003) afirma que, quanto maiores os níveis de porosidade do agregado, menores as resistências do concreto, o que torna a massa específica diretamente proporcional à resistência do concreto.

2.1.2.3 Absorção de água

Seguindo com o fator porosidade, Buttler (2003) cita que o AGRC e o concreto endurecido produzido com este material apresentam taxas de absorção 40% maiores que os agregados naturais, sendo que o índice de vazios pode chegar a 30%. Em estudos apresentados por Lovato (2007) as taxas de absorção do AGRC mais elevadas que no AGN que é da ordem de 9,25%, interferem na relação água/cimento, e o concreto tende a ficar muito seco, e por isso são utilizados plastificantes para garantir a trabalhabilidade. Ou, ainda, segundo Buttler (2003),

para garantir a trabalhabilidade, quanto maior a porção de agregados graúdos reciclados, deve-se aumentar a relação água/cimento.

Para garantir que os agregados reciclados não absorvessem em grande quantidade a água da mistura, Cordeiro (2013) utilizou um método de pré-molhagem, estimado a partir da taxa de absorção, com duração em torno de 10 min, até atingir teor ótimo de saturação de 80%. Malysz (2018) acredita que esse método seja benéfico, pois a água interna dos poros dos agregados, após o início da pega do cimento, migram à matriz cimentícia, permitindo cura interna do concreto.

2.1.3 Concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto

O concreto possui uma estrutura complexa formada por materiais de diferentes propriedades que interagem entre si e resultam em uma mistura bastante heterogênea. Para entender os processos e atingir resultados de resistência e de durabilidade, é necessário conhecer e ter controle dessas propriedades.

A estrutura do agregado reciclado de concreto é formada por três fases, o agregado graúdo, uma zona de transição e a argamassa. As últimas duas fases são responsáveis por aumentar a heterogeneidade do concreto, pois suas propriedades variam muito dentro de um mesmo material. Quando utilizamos agregados reciclados de concreto, que possuem a mesma estrutura trifásica, na produção de novos concretos, há a formação de uma nova zona de transição, resultando em um material ainda mais frágil (BUTTLER, 2003).

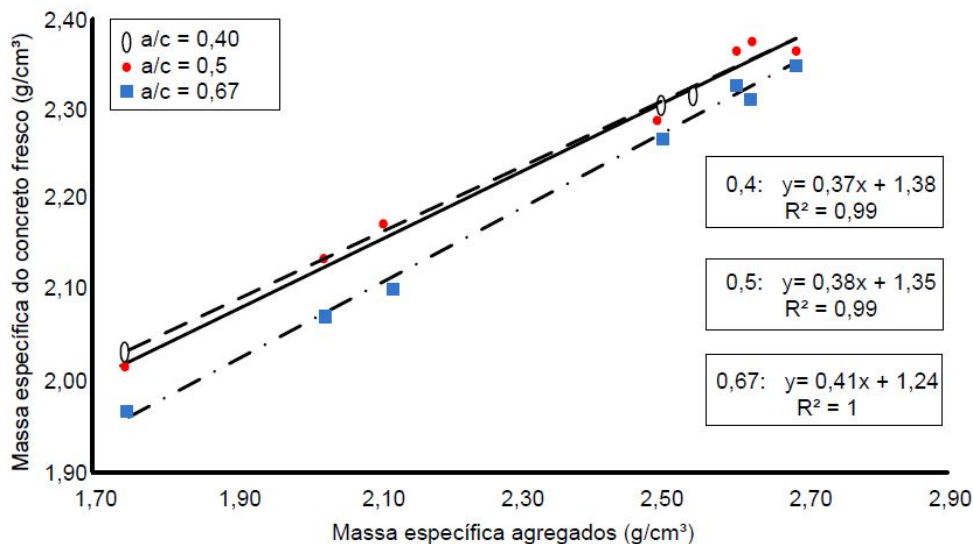
Leite (2001) afirma que concretos com até 30% de substituição dos AGN pelos reciclados não apresentam mudanças significativas em suas propriedades, porém não chega a ser uma quantidade suficiente já que o objetivo do estudo é reduzir impactos ambientais.

2.1.3.1 Propriedades físicas

2.1.3.1.1 Massa específica

O aumento nos teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados é causa da diminuição da densidade do concreto, isso porque os materiais reciclados possuem argamassa aderida à brita, que o torna mais poroso. Dessa forma, a menor massa específica do concreto é reflexo da massa específica principalmente do agregado gráúdo presente na mistura, conforme mostra a Figura 3. Ou seja, do mesmo modo que a forma, a textura, o tamanho e a porosidade do agregado influenciam na sua massa específica, estes fatores impactam diretamente na massa específica do concreto (CORDEIRO, 2013).

Figura 3 - Correlação entre a massa específica do concreto fresco e a massa específica dos agregados reciclados



Fonte: Cordeiro (2013)

Pesquisas realizadas por Gonçalves (2001) relatam que a massa específica de concretos produzidos com agregados gráudos reciclados podem diminuir de 5% à 10%, ou então 50 à 100 kg/m³ em comparação aos concretos naturais. Já testes realizados por Buttler (2003), mostraram variações mínimas de 5% de aumento na massa específica do concreto com agregado reciclado para o natural em estado

fresco, e quando no estado endurecido esse valor aumentou em até 13%. Esse parâmetro depende muito da formação de vazios no concreto. De acordo com Neville (2016), um dos fatores influenciadores é a forma do agregado graúdo ser lamelar e alongada, aumentando a formação de vazios decorrentes do acúmulo de água e exsudação sob eles, afetando também na durabilidade do concreto.

2.1.3.1.2 Consistência

O ensaio de consistência é a forma de medir a trabalhabilidade do concreto fresco, que de certa forma é considerado um parâmetro qualitativo dentro dos experimentos. A relação água/cimento é o fator mais importante quando se trata de trabalhabilidade, pois uma vez que os agregados reciclados são mais porosos e absorvem mais água, para garantir o mesmo valor de *slump* é necessário adicionar mais água à mistura (CORDEIRO, 2013).

Leite (2001) complementa que, além do aumento nas taxas de absorção, a forma irregular e a superfície áspera do agregado reciclado também influenciam na trabalhabilidade do concreto. Quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor a taxa de absorção, aumentando a trabalhabilidade. Por outro lado, misturas com menores trabalhabilidades necessitam de mais água, o que desencadeia na interferência das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido.

Segundo Cordeiro (2013) só é possível manter fixa a relação a/c e a medida de abatimento utilizando aditivos. Entretanto, outros métodos são estudados para manter a trabalhabilidade do concreto, como a pré-molhagem do agregado reciclado. De acordo com a autora, cada teor de pré-molhagem influencia de forma diferente na trabalhabilidade.

A trabalhabilidade não é um fator intrínseco na definição das características do concreto, pois ela deve estar associada ao tipo de estrutura, local de aplicação e a forma de manuseio desse material. Isso quer dizer que, um concreto trabalhável o suficiente para não segregar em uma fundação maciça, pode não ser adequado para estruturas esbeltas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.3.1.3 Absorção

Da mesma forma que influencia na massa específica, a porosidade do agregado reciclado aumenta as taxas de absorção do próprio agregado e proporcionalmente as do concreto endurecido. Esses poros se formam quase que totalmente depois que a água presente na pasta evapora no processo de cura do concreto. O seu tamanho vai depender da forma e da qualidade de adensamento, do formato, quantidade e granulometria do agregado gráudo e das condições de cura. Quando endurecido, esse poros têm a capacidade de armazenar água e acelerar o processo de deterioração do concreto, afetando sua durabilidade (CARRIJO, 2005).

Entretanto, Carrijo (2005) também relaciona positivamente a presença de poros no agregado reciclado e o processo de cura do concreto. Agregados reciclados absorvem grande quantidade da água da mistura, até ficar saturado, e durante o processo de cura, a água dos poros evapora ou ajuda na hidratação da pasta de cimento, ou seja, ajuda na cura interna do concreto. Porém, a efetividade do processo depende do tamanho dos agregados e do espaçamento entre eles, pois se estiverem muito distantes a água pode não atingir alguns pontos da pasta.

Buttler (2003) explica que a quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado influencia diretamente a porosidade e consequentemente a capacidade de absorção do concreto. Segundo o autor, concretos produzidos com agregados reciclados podem apresentar uma absorção média cerca de 40% superior à de concretos com agregados naturais. Já o índice de vazios pode aumentar cerca de 30% na mesma comparação.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a alta permeabilidade do concreto em comparação a da pasta de cimento é decorrente das zonas de transição presentes entre o agregado e a pasta. O grau de influência das zonas de transição dependem grande parte da distribuição granulométrica do agregado. Elas possuem microfissuras maiores que as cavidades da matriz da pasta de cimento, ocasionadas por retração de secagem e por esforços entre a pasta e o agregado.

Os concretos produzidos com agregados reciclados possuem uma segunda zona de transição presente no próprio agregado formado por brita e uma camada de argamassa, e por isso, conforme o aumento das taxas de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, aumentam as taxas de absorção do concreto (CARRIJO, 2005).

2.1.3.2 Propriedades mecânicas

2.1.3.2.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é a capacidade que um material tem de resistir à esforços e tensões sem sofrer ruptura. Segundo Ambrozewicz (2012), essa é uma das propriedades mais importantes para avaliação da qualidade do concreto, considerando que em estruturas de concreto armado ele é o principal responsável por resistir à esses esforços.

Entre os fatores que influenciam na resistência à compressão estão a porosidade e a relação a/c , que dependem da forma, da textura e do tamanho das seções do agregado gráudo utilizado. Entretanto, Gonçalves (2001) complementa que o grau de adensamento e as condições de cura, além do tipo e dimensão do agregado, também possuem uma parcela de intervenção. Outros fatores, relacionados à execução do ensaio são o formato do corpo de prova e o tipo e a velocidade da tensão aplicada.

Torres e Burkhart (2016), comparam em sua pesquisa concretos produzidos com agregado natural e com substituição total por agregado reciclado de concreto com diâmetros máximos de 25 mm, em que a resistência reduz em torno de 14%. Os autores complementam que quanto menor a relação água/cimento, maiores as resistências.

Quando se trata de microestrutura do concreto, formada por agregado, zona de transição e argamassa, a fase agregado é a mais densa e firme. Em contrapartida, a matriz pasta de cimento e a zona de transição são fases mais

frágeis, sendo determinantes na resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A zona de transição presente no agregado reciclado somado a zona de transição do concreto, resultam em um material mais frágil e menos resistente a esforços de compressão. De acordo com Vieira e Dal Molin (2011), esse é o motivo do concreto romper com uma tensão mais baixa que a resistência do agregado e da pasta, isso porque microfissuras são formadas antes mesmo do carregamento ser aplicado, decorrentes da exsudação, retração e secagem durante o processo de endurecimento do concreto.

Mehta e Monteiro (2014) explanam que a zona de transição contém a maioria dos vazios presentes no concreto, e esses vazios abrigam a maior parte da água absorvida. Quando há a soma de zonas de transição, o mesmo acontece com o número de vazios e a capacidade de absorver água. Dessa forma, estruturas de concreto armado produzidas com concretos reciclados teriam suas armaduras mais suscetíveis a fenômenos de corrosão, com maiores probabilidades de ruptura, diminuindo a durabilidade da estrutura.

As propriedades dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados variam muito de acordo com cada amostra de agregado utilizado na mistura. Segundo Gonçalves (2001), quanto maior a resistência do concreto que dá origem ao agregado reciclado, maior a resistência do novo concreto. Quando comparados novos concretos produzidos com concretos originais de 80 MPa e 40 MPa, a resistência pode decrescer cerca de 5%.

De acordo com Buttler (2003), em concretos de baixa e média resistência, o parâmetro resistência dos agregados graúdos não chega a influenciar significativamente na resistência final do concreto endurecido. Porém, quando são de alta resistência as características dos agregados graúdos devem ser levados em consideração. Estudos realizados por Cabral et. al (2007) apresentaram reduções de

14% na resistência à compressão de concretos de traços com 50% de substituição e 28% para os com 100% de substituição do AGN por AGRC.

2.1.3.2.2 Módulo de elasticidade

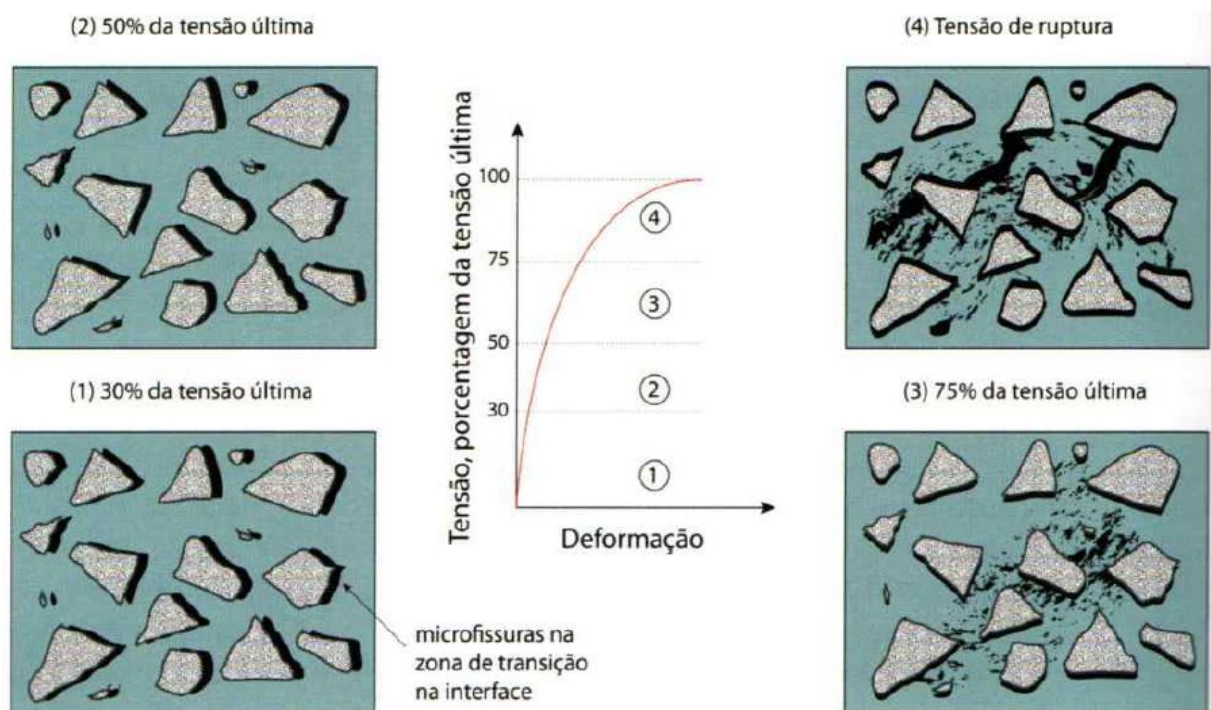
Outro parâmetro necessário em aspectos de projeto é o módulo de elasticidade, pois ele auxilia na previsão de deformações dos elementos da estrutura e nas tensões entre o concreto e o aço. Ele é exposto em um gráfico com a relação tensão deformação, em que o módulo é o coeficiente angular da parte linear do diagrama (ESTOLANO, et al., 2018).

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica, porém o concreto não é um material elástico de fato, ou uniforme capaz de distribuir as tensões de forma igual ao longo de toda peça. Por isso, para evitar fissuras no concreto e respeitar a forma linear do gráfico, limita-se o valor máximo da tensão em um percentual da resistência final à compressão do concreto, que segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017a) é de 30% (BENETTI, 2012).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), devido à diferença nos módulos de elasticidade dos componentes do concreto, diferentes níveis de tensão se formam no agregado e na pasta, resultando em fissuras na zona de transição. A partir disso, o comportamento da estrutura do concreto sob tensões pode ser dividido em quatro fases.

A Figura 4 resume as fases da tensão-deformação sofrida por concretos convencionais. Antes de aplicada a tensão, microfissuras já se formam na área de transição. Depois disso, até 30% da tensão máxima essas fissuras ficam estáveis, formando uma curva tensão deformação linear, chamado de estágio 1. Somente acima de 75% da tensão última a curva se deforma em direção horizontal até atingir instabilidade e o material romper (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 4 - Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Segundo Gonçalves (2001), o módulo de elasticidade do concreto está diretamente relacionado à porosidade do agregado. Uma vez que a porosidade influencia na massa específica do agregado, a partir dessa medida quantitativa pode-se ter uma estimativa da influência no módulo de elasticidade. Ainda, segundo o autor, o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, porém isso ainda é dependente do módulo de elasticidade do agregado e da proporção do volume de agregado utilizado.

Estudos apresentados por Benetti (2012) resultaram em valores variando entre 43% e 50% de redução no módulo de elasticidade de concretos produzidos com AGRC quando comparados a concretos com AGN. A autora ainda cita que o módulo de elasticidade reduz proporcionalmente ao aumento dos teores de substituição.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados para atingir o objetivo da pesquisa, que consiste em avaliar a influência da substituição de diversos teores do AGN por AGRC na trabalhabilidade, na resistência à compressão, na absorção e no módulo de elasticidade do concreto.

3.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram listados com suas características básicas e orientações presentes nas Normas Técnicas Brasileiras (NBR) que sequencialmente foram testados em laboratório e comparados os resultados.

3.1.1 Cimento

Optou-se por utilizar o Cimento Portland CP V - ARI - RS, que tem alta resistência inicial, traz resultados de ganho de resistência logo nas primeiras idades, além de possuir adições inferiores a 5%, já que os processos de dosagem vão sofrer modificações. O ensaio para caracterização do cimento foi o de massa específica, desenvolvido com base na NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica (ABNT, 2017b).

O ensaio foi realizado 2 vezes, como o mínimo requerido pela norma, sendo que a diferença entre os dois resultados não poderia variar mais que 0,02 g/cm³, e

dos resultados foi calculada a média aritmética. A massa específica do cimento obtida foi de 2,99 g/cm³.

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi a areia média de origem natural da região do Vale do taquari fornecida pelo Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC). Para a amostragem do material foi feita análise granulométrica seguindo a NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Os ensaios de massa específica e unitária seguindo a NBR NM 52 (ABNT, 2009d) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. Os resultados obtidos estão especificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da areia

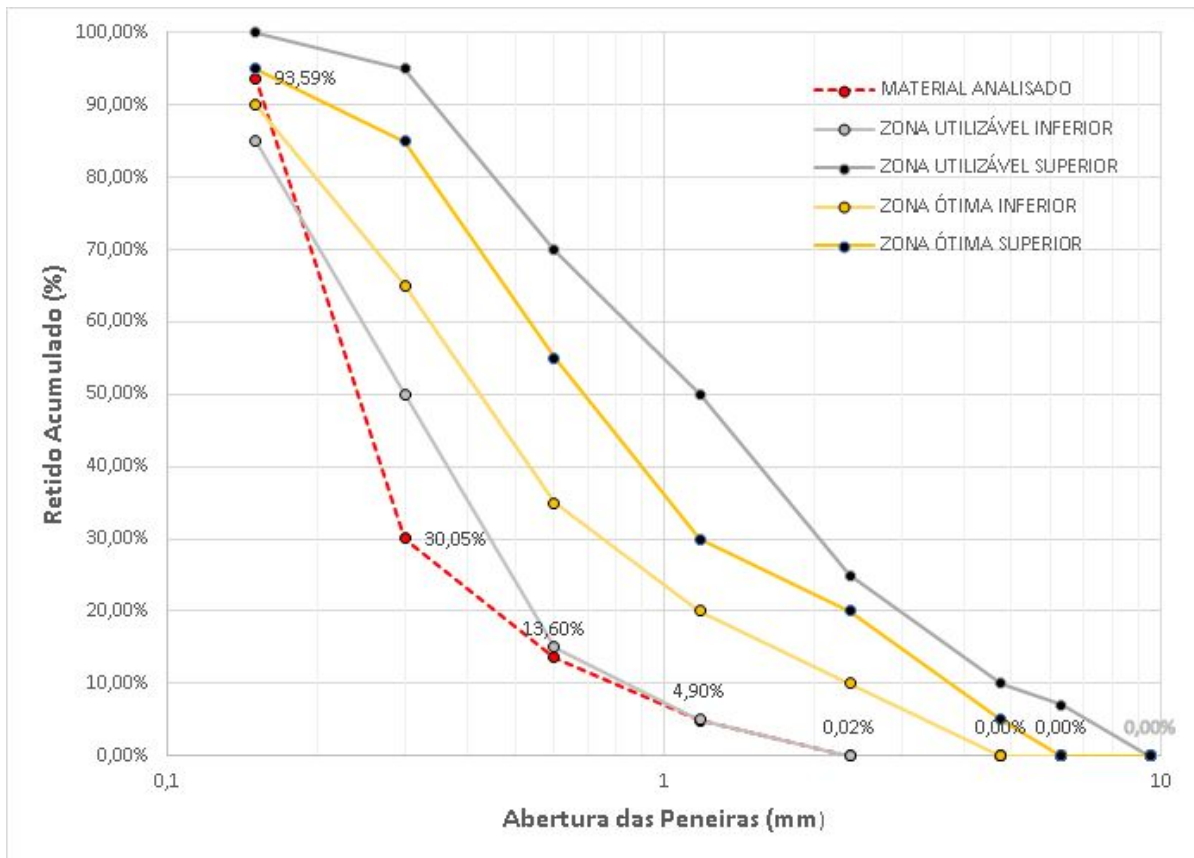
Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,75	0	0
2,36	0	0
1,18	5	5
0,6	9	14
0,3	16	30
0,15	64	94
Fundo	6	100
Módulo de Finura (MF)		1,42
Dimensão máxima característica (mm)		1,18
Massa específica (g/cm³)		2,60
Massa unitária (g/cm³)		1,49

Fonte: autora (2020)

Ambrozewicz (2012) classifica os agregados miúdos de acordo com o MF em areias grossas, médias e finas. As areias grossas possuem $MF > 3,90$, as areias médias $3,90 > MF > 2,4$ e as areias finas $MF < 2,40$. Nesse caso, como o MF é 1,42, a

areia é considerada fina. O comparativo entre as características da areia do estudo e os limites ótimos e utilizáveis inferiores e superiores estão expostos no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia média



Fonte: autora (2020)

A distribuição granulométrica deve, preferencialmente, atender os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), porém, como isso não ocorreu nesse caso, a norma permite utilizar distribuições diferentes das zonas inferiores e superiores, desde que os estudos de dosagem comprovem a aplicabilidade.

3.1.3 Agregado graúdo natural

Para a pesquisa foi utilizado agregado graúdo convencional de origem basáltica da região do Vale do Taquari, disponível no LATEC. Foram realizados ensaios de caracterização, como o de composição granulométrica e de módulo de

finura, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Além disso foram necessários ensaios de massa unitária com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), e de massa específica e de absorção de água baseados na NBR NM 53 (ABNT, 2009e). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 2 e comparados no Gráfico 2.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da brita 1

Abertura das peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado
25	0	0
19	3	3
12,5	75	78
9,5	21	99
6,3	1	100
4,75	0	100
Fundo	0	100
Módulo de finura (MF)		7,02
Dimensão máxima característica (mm)		19,00
Massa específica (g/cm³)		2,95
Absorção (%)		2,40
Massa unitária (g/cm³)		1,37

Fonte: autora (2020)

3.1.4 Agregado graúdo reciclado

3.1.4.1 Coleta das amostras

O agregado reciclado consumido na pesquisa é oriundo de concreto, de resistência variando entre 25 MPa e 40 MPa, coletado em canteiros de obra de empresa privada da cidade de Encantado/RS e amostrado conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2009c). No LATEC foi processado através de britador do tipo mandíbula, conforme mostra a Figura 5, sendo que, nesse processo, cerca de 50% da massa resultante foram finos oriundos da argamassa aderida na brita.

Figura 5 - Britador do tipo mandíbula



Fonte: autora (2020)

O formato é em sua maioria angular, consequência do tipo de britador utilizado. Foram considerados agregados graúdos reciclados aqueles com dimensões passantes na peneira de abertura 25 mm e retidas na peneira de abertura 4,75 mm, abrangendo dimensões de brita 0, brita 1 e brita 2, chegando no

final a cerca de 80 kg de agregado, formado pela brita envolta por argamassa, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Amostra de AGRC britado



Fonte: autora (2020)

3.1.4.2 Ensaios de caracterização

Para os ensaios de caracterização, a amostra foi reduzida conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001), em que foi utilizado separador mecânico para quartear o material. Esse processo foi indispensável pois o material era bastante heterogêneo, na sua forma, dimensões, resistência e procedência.

Para definir características e especificações foram realizados ensaios de composição granulométrica e de módulo de finura a partir da NBR NM 248 (ABNT, 2003), de massa unitária com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), de massa específica e de absorção de água baseado na NBR NM 53 (ABNT, 2009e), cujos resultados estão especificados na Tabela 3.

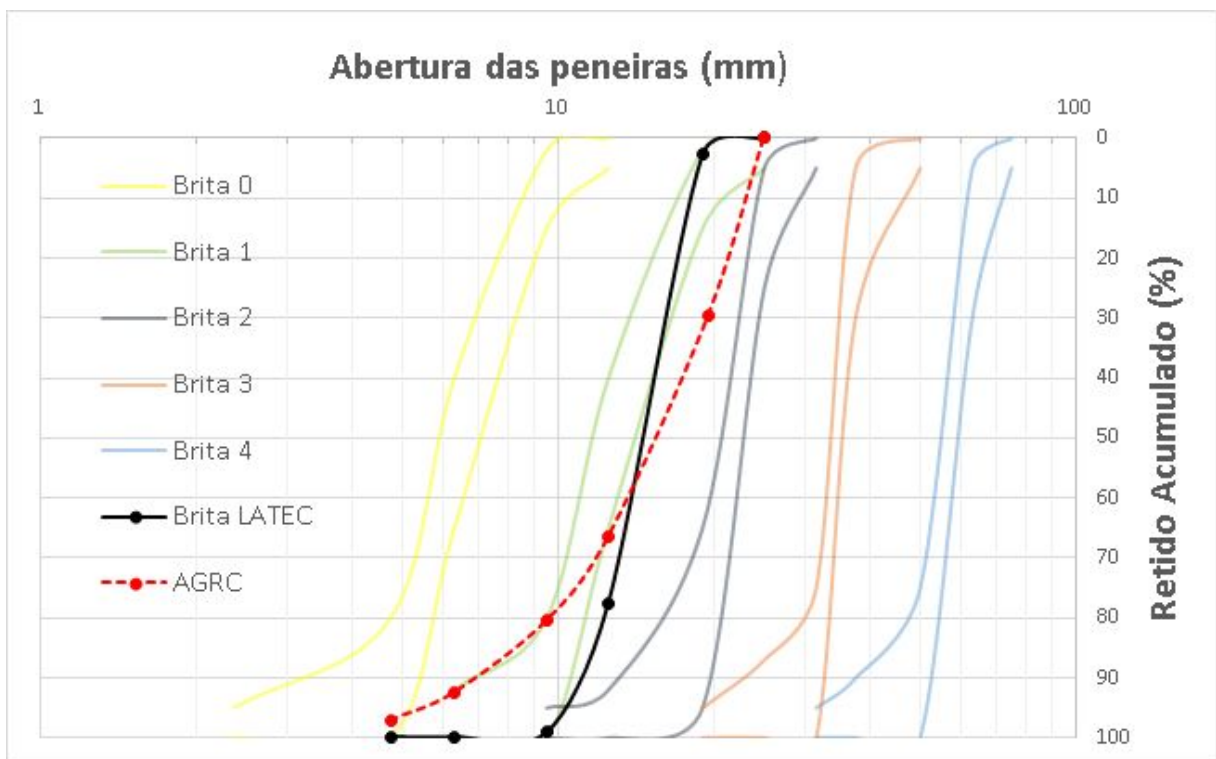
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do AGR

Abertura das peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado
25	0	0
19	30	30
12,5	37	67
9,5	14	81
6,3	12	93
4,75	4	97
Fundo	3	100
Módulo de finura (MF)		7,07
Dimensão máxima característica (mm)		25,00
Massa específica (g/cm³)		2,09
Absorção (%)		8,56
Massa unitária (g/cm³)		1,12

Fonte: autora (2020)

O Gráfico 2 mostra os limites de granulometria dos diferentes tipos de brita expostos na NBR 7211 (ABNT, 2009a). O comportamento da curva da brita natural se enquadra quase totalmente nos limites da brita 1, tendo apenas um ponto disperso. Já a curva do AGRC, apresentou uma declividade menor, com um maior número de pontos dispersos, o que significa que a sua granulometria é menos uniforme e com mais variações de tamanhos.

Gráfico 2 - Curva granulométrica AGN e AGRC



Fonte: autora (2020)

3.1.5 Água de amassamento

A água para aplicação nos experimentos foi a fornecida pela Companhia Rio-Grandense de Saneamento (CORSAN), que abastece o LATEC, seguindo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009b).

3.2 Métodos

3.2.1 Determinação dos traços

A determinação do traço referencial e dos adaptados para as substituições de agregados, foi referenciado pelo método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Esse método consiste na moldagem de corpos-de-prova de concreto com um traço referencial (1:5), em que se faz o ajuste do teor de argamassa e da consistência, que seguirão constantes para posterior execução de 2 traços, um pobre (1:6,5) e um rico (1:3,5).

Com o traço referência (1:5), utilizando agregados naturais, chegou-se a um teor de argamassa de 51%, uma relação água/cimento de 0,54 e uma trabalhabilidade de 120 mm \pm 20 mm. A partir do referência, foram confeccionados os traços rico e pobre, e moldados 6 corpos-de-prova para cada um, a fim de realizar o ensaio de resistência à compressão axial. Com as resistências à compressão aos 3, 7 e 28 dias dos 3 traços, expostas na Tabela 4, foi possível montar um diagrama de dosagem

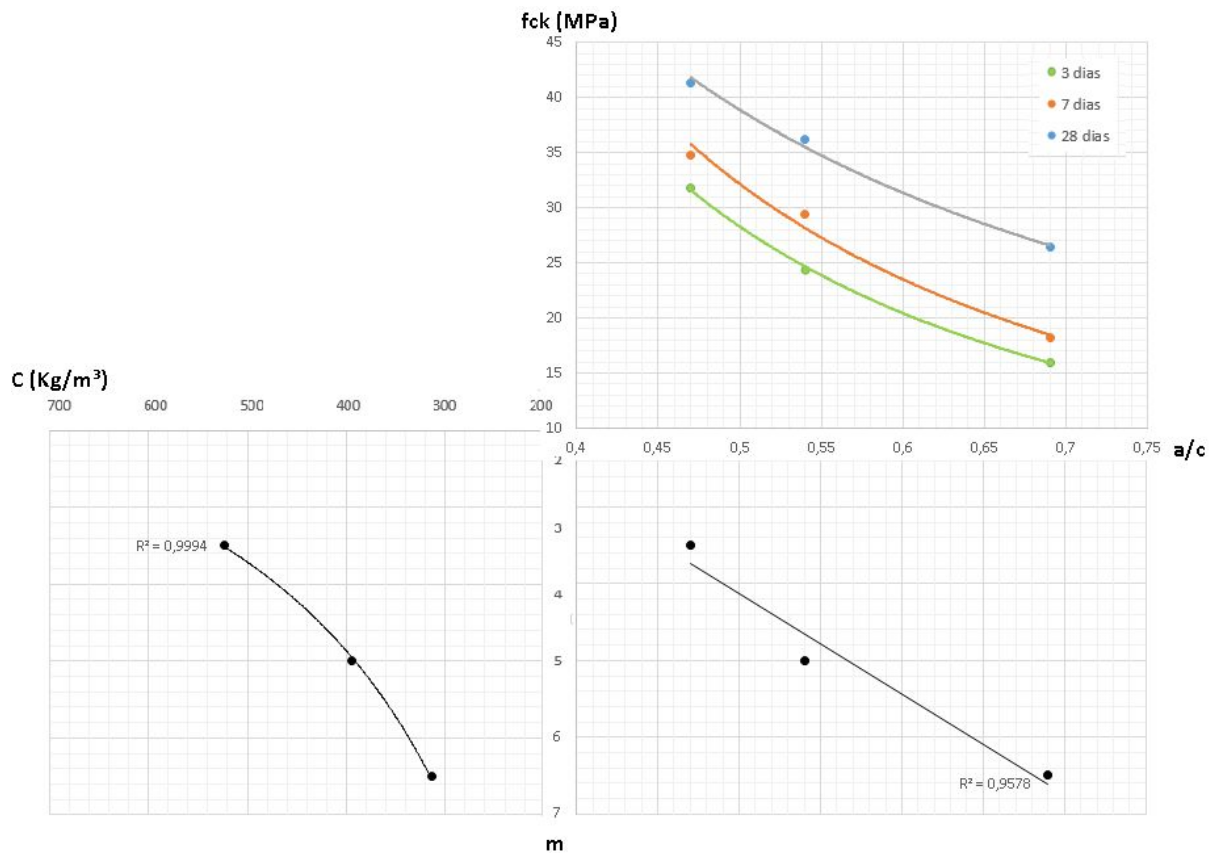
Tabela 4 - Traços do método IPT-EPUSP

Traço	Cimento	Areia (a)	Brita (p)	m (a+p)	a/c	C - Consumo teórico de cimento	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
I	1	2,83	3,68	6,5	0,69	314	16,0	18,2	26,4
II	1	2,06	2,94	5,0	0,54	394	24,4	29,4	36,2
III	1	1,30	2,21	3,5	0,47	523,2	31,8	34,8	41,3

Fonte: autora (2020)

O diagrama de dosagem apresenta variáveis em que é possível correlacionar resistência à compressão (f_{ck}), relação água/cimento (a/c), teor de agregados (m) e consumo de cimento (C), conforme mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3 - Diagrama de dosagem



Fonte: autora (2020)

Para definir novos traços a partir da resistência no diagrama, foi necessário adicionar um desvio padrão (S_d), definido a partir de condições de preparo. Nesse caso, em que o concreto deve ser entre as classes C10 e C80, e que o cimento, agregados e a água de amassamento são medidos em massa, Ambrozewicz (2012) cita que deve-se considerar um S_d de 4,0 MPa, e calcular a resistência à compressão conforme a Equação 1.

$$F_{ck} = F_{cm} + 1,65S_d \quad (1)$$

Sendo:

Fck a resistência característica do concreto (MPa);

Fcm a resistência média dos exemplares (MPa);

Sd o desvio padrão (MPa).

A partir dessa transformação, pôde-se determinar os traços para as resistências de 25 MPa (C25) e 30 MPa (C30), conforme a Tabela 5. Os traços relacionam os fatores multiplicadores para consumo de areia (a), de brita (p), do teor de agregados (m), da relação água/cimento (a/c) e o consumo teórico de cimento (C) para produzir 1m³ de concreto.

Tabela 5 - Traços referências

Fck (MPa)	Cimento	Areia (a)	Brita (p)	m (a+p)	a/c	C - Consumo teórico de cimento por m³ de concreto
25	1	2,25	3,12	5,37	0,59	370
30	1	1,79	2,69	4,48	0,53	430

Fonte: autora (2020)

Os traços foram determinados respeitando o proposto na NBR 6118 (ABNT, 2014), que diz que, para a Classe de Agressividade da região em que se localiza Encantado/RS, considerada urbana, ou seja, classe II, em concretos C25 e C30 a relação a/c deve ser menor ou igual a 0,60.

Para cada traço referência foi substituído em 50% (TR50) e 100% (TR100) o AGN por AGRC, totalizando 6 traços diferentes. Em função dessa substituição ser em volume e o AGRC possuir uma massa específica menor que o AGN, foi feita a equivalência para a massa dos agregados, conforme a Equação 2.

$$Massa\ de\ AGRC = \frac{Massa\ de\ AGN}{\rho_{AGN}} \times \rho_{AGRC} \quad (2)$$

Sendo:

Massa de AGRC a massa de agregado graúdo reciclado de concreto (Kg);

Massa de AGN a massa de agregado graúdo natural (Kg);

ρ_{AGN} a massa específica de agregado graúdo natural (Kg/m³);

ρ_{AGRC} a massa específica de agregado graúdo reciclado de concreto (Kg/m³).

A quantidade de material utilizado em cada traço, considerando 0,02 m³ para o volume de concreto necessário para realizar todos os ensaios, transformando a quantidade de agregado em volume para conseguir a equivalência e adicionando 10% de margem considerando as perdas, pode ser visualizada na Tabela 6.

Tabela 6 - Traços em massa para uma unidade de volume

Fck (MPa)	Traço	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	AGRC (Kg)	Água (Kg)
25	TRRF	8,32	18,69	25,94	0	4,93
	TR50	8,32	18,69	12,97	9,19	4,93
	TR100	8,32	18,69	0	18,38	4,93
30	TRRF	9,66	17,34	25,94	0	5,08
	TR50	9,66	17,34	12,97	9,19	5,08
	TR100	9,66	17,34	0	18,38	5,08

Fonte: Autora (2020)

3.2.2 Produção dos concretos e moldagem dos corpos-de-prova

Para a mistura dos materiais provenientes de cada traço explícitos na Tabela 6, seguiu-se uma ordem frequentemente utilizada na produção de concretos, sendo uma parte da água com a brita, cimento, areia e o restante da água conforme a necessidade durante o processo. O tempo para que a mistura fique homogênea varia entre 3 e 5 minutos, mas sempre até atingir uma consistência plástica.

Após os ensaios de consistência e massa específica descritos em 3.2.3 e 3.2.4, foram realizadas as moldagens dos corpos-de-prova em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Seguindo o descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015), como em todos os traços o abatimento foi igual ou superior à 100 mm, e os

CPs possuíam dimensão básica de 100 mm, o processo de adensamento precisou ser manual. Foram moldados 15 CPs para cada traço, totalizando 90 CPs.

Seguido do adensamento da última camada, foi feito o rasamento da superfície com a borda e os CPs armazenados para cura. Durante as primeiras 24h foram armazenados protegidos de intempéries e cobertos para evitar a perda de água do concreto, e depois disso foram desmoldados e curados em câmara úmida até a idade de ensaio.

3.2.3 Ensaio de consistência (Abatimento de tronco de cone)

O ensaio de consistência do concreto pelo método do Abatimento ao tronco de cone, regido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), determina se o teor a/c especificado garante trabalhabilidade suficiente para cada utilização. Esse ensaio foi realizado com todos os traços quantas vezes foram necessárias para atingir os 120 ± 20 mm determinados como padrão.

3.2.4 Ensaio de Massa específica do concreto

A massa específica do concreto é a massa fresca adensada por unidade de volume, incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado. Para cada traço, o concreto em estado fresco foi sujeito a ensaio para definição da sua massa específica, de acordo com NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.2.5 Ensaio de compressão axial

Para os ensaios de compressão axial foram moldados 2 CPs para cada idade, sendo elas 7, 28 e 63 dias, seguindo o descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova foram mantidos moldados e protegidos de intempéries por 24h, quando foram desmoldados e mantidos em câmara úmida até atingirem idade e serem rompidos.

Os procedimentos durante o ensaio e para definição dos resultados foram executados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e os rompimentos realizados em uma prensa hidráulica conforme a Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de compressão axial



Fonte: Autora (2020)

A resistência à compressão axial é definida pela média entre os valores encontrados para cada CP do mesmo traço e idade.

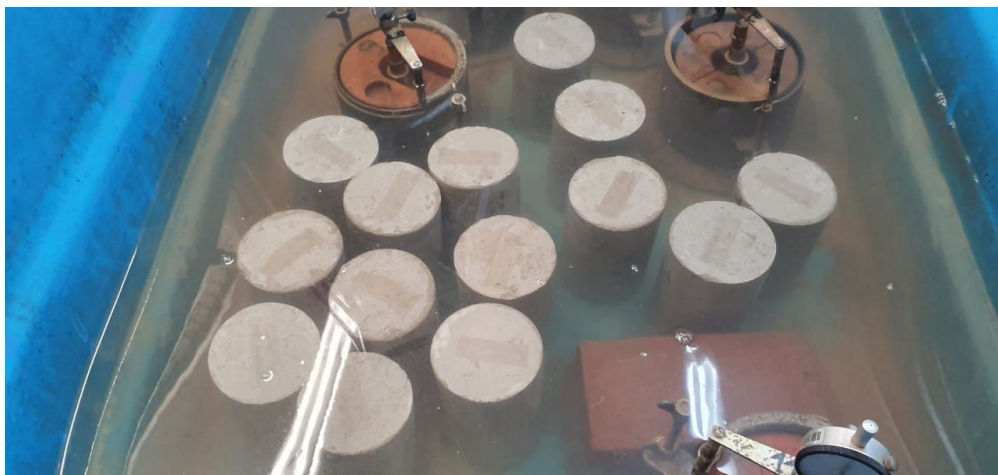
3.2.6 Ensaio de absorção e índice de vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios, regido pela NBR 9778 (ABNT, 2005) determina a capacidade de um material absorver água em um determinado espaço de tempo. É um quesito importante na determinação da durabilidade do concreto. Este ensaio é realizado em corpos de prova endurecidos, com idade de 28 dias, e para isso, foram moldados 3 CPs para cada traço.

Aos 28 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, pesados e postos em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 72 h, quando foram retirados e

deixados esfriar para posterior pesagem. As amostras foram imersas em água com 23 ± 2 °C por 72 h conforme a Figura 8.

Figura 8 - Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autora (2020)

Após as 72 h, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio d'água onde foi levado à ebulição por 5 h. Naturalmente, foi deixado a água esfriar até atingir os 23 ± 2 °C, quando os corpos de prova foram enxugados e pesados em balança normal e balança hidrostática.

3.2.7 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Para definir a quantidade de água que o concreto absorve por capilaridade, foram submetidos ao ensaio 3 CPs para cada traço aos 28 dias de idade, seguindo a NBR 9779 (ABNT, 2012). As amostras foram moldadas, deixadas por 24 h protegidas de intempéries e até completar 28 dias foram mantidas em câmara úmida. Neste dia, foram pesados e colocados em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 72h até constância de massa. Seguindo, os CPs foram resfriados e pesados novamente.

Em um recipiente posicionado em local com temperatura ambiente foi ajustado um suporte, onde as amostras foram alocadas e foi preenchido de água até o nível 5 ± 1 mm acima da face inferior dos CPs, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autora (2020)

Foram determinadas as massas com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, sempre mantendo o nível da água inicial. Após a pesagem de 72h, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, para poder visualizar o comportamento e distribuição da água no seu interior.

3.2.8 Ensaio de Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade, regido pela NBR 8522 (ABNT, 2017a), foi realizado em 3 CPs para cada traço com idade de 28 dias. As amostras foram moldadas e mantidas por 24 h em ambiente protegido e até completar 28 dias, guardadas em câmara úmida.

A tensão aplicada durante o ensaio representa 30% do necessário para ruptura da amostra em ensaio de compressão. Em função disso, cada traço

necessitou uma tensão diferente para sofrer deformação, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Tensão aplicada no ensaio de módulo de elasticidade

Classe de resistência	Traço	Resistência à compressão axial (MPa)	Tensão em 30% da ruptura prevista (MPa)
C25	TRRF	35,06	10,52
	TR50	30,00	9,00
	TR100	26,52	7,96
C30	TRRF	36,00	10,80
	TR50	30,84	9,25
	TR100	28,52	8,55

Fonte: Autora (2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são expostos resultados conforme a metodologia proposta, discutidos e comparados aos resultados abordados em bibliografia.

4.1 Concreto fresco

4.1.1 Consistência

Para determinar a trabalhabilidade de cada concreto foi utilizado o método do Abatimento de tronco de cone, descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998). O valor base do *slump* ficou em 120 ± 20 mm, a fim de manter a variável comparativa, e se necessário, seria utilizado aditivo plastificante. Dessa forma, os resultados estão explícitos na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados medidos no ensaio de abatimento do tronco de cone

Classe do concreto	Abatimento (mm)		
	TRRF	TR50	TR100
C25	132	135	190
C30	100	140	170

Fonte: Autora (2020)

Os dois traços referência, após a mistura de todos os componentes do concreto e realização do ensaio, apresentaram abatimento abaixo do valor fixado, e por isso o uso do aditivo plastificante em aproximadamente 0,2% foi necessário. Nos

traços com 50% de substituição, apesar da pré-molhagem do agregado reciclado, ainda se fez necessário o uso de aproximadamente 0,2% de aditivo. Já nos traços com 100% de substituição, as medidas ultrapassaram os valores fixados sem o uso do aditivo, e por isso os resultados foram mantidos. Acredita-se que principal motivo do último caso foi a alta interação da água da pré-molhagem com os finos presentes envoltos no AGRC, além da absorção da argamassa aderida à brita. Os abatimentos dos traços de classe C30 podem ser comparados na Figura 10.

Figura 10 - Verificação do abatimento dos traços de classe C30



Fonte: Autora (2020)

Experimentos realizados por Leite (2001) concluíram que, ao mesmo tempo que os agregados podem absorver a água da mistura, há também um processo de perda. A hidratação do cimento aumenta a temperatura da mistura, influenciando no transporte interno da água. Além disso, enquanto dentro das misturas os agregados se movimentam, estes podem sofrer desagregação e fricção, que elevam as taxas de perda de água muito rápido. Estes podem ser alguns dos motivos do aumento significativo dos valores de *slump* dos traços com 100% de substituição.

Maiores valores de *slump* aumentam a trabalhabilidade e a facilidade da sua utilização em obra, e isso depende exclusivamente do fator a/c empregado no traço. Com isso, estudos realizados por Torres e Burkhart (2016) confirmam que o aumento desse fator diminui proporcionalmente a resistência do concreto, e Neville (2016) complementa que os grãos com maiores dimensões podem ocasionar depósito de água sob eles, resultando em poros após a cura do concreto.

Concluindo, os traços TR100 que ultrapassaram os limites definidos na dosagem podem ser utilizados, desde que os resultados de resistência atinjam 100% do proposto aos 28 dias.

4.1.2 Massa específica

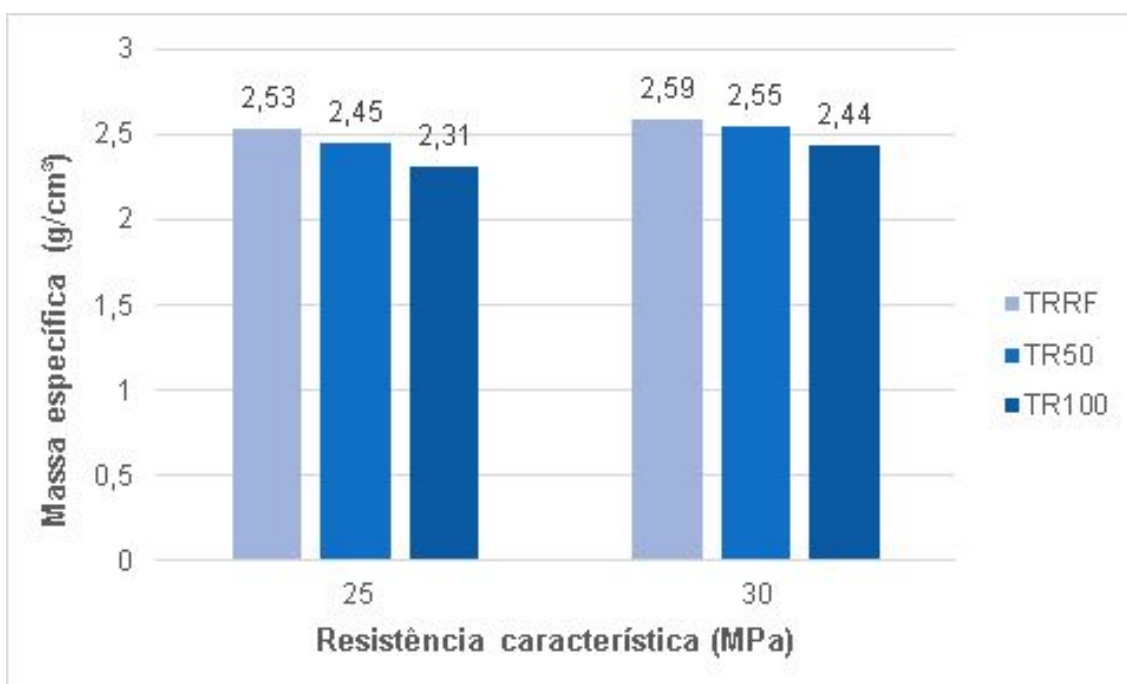
A massa específica do concreto em estado fresco foi determinada seguindo o descrito na NBR 9833 (ABNT, 2008). Os resultados obtidos podem ser conferidos na Tabela 9 e comparados no Gráfico 4.

Tabela 9 - Massa específica dos concretos

Classe de resistência	Massa específica (g/cm ³)		
	TRRF	TR50	TR100
C25	2,53	2,45	2,31
C30	2,59	2,55	2,44

Fonte: Autora (2020)

Gráfico 4 - Massa específica do concreto fresco



Fonte: Autora (2020)

Percebe-se que os resultados encontrados nos concretos produzidos com AGRC foram menores que nos produzidos exclusivamente com AGN. Leite (2001) explica que os maiores influenciadores da massa específica de concretos são a procedência, forma, textura, tamanho e porosidade do agregado graúdo. Por isso, em função dos agregados reciclados já apresentarem valores de massa específica menores que a brita natural, já era esperado a redução dos resultados a medida do aumento das substituições.

A classe de resistência também influenciou na massa específica dos concretos. Os de classe C30 apresentaram valores de massa específica maiores que os de classe C25, independente do traço ser referência ou com teores de substituição.

4.2 Concreto endurecido

4.2.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial é considerado relativamente simples para controle de obra e análises laboratoriais. Por isso, é um dos parâmetros mais utilizados para determinar a qualidade e aplicabilidade do concreto. Os resultados dos ensaios de compressão nos corpos-de-prova aos 7, 28 e 63 dias dos concretos de resistência característica 25 MPa podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados de resistência à compressão dos concretos de classe C25

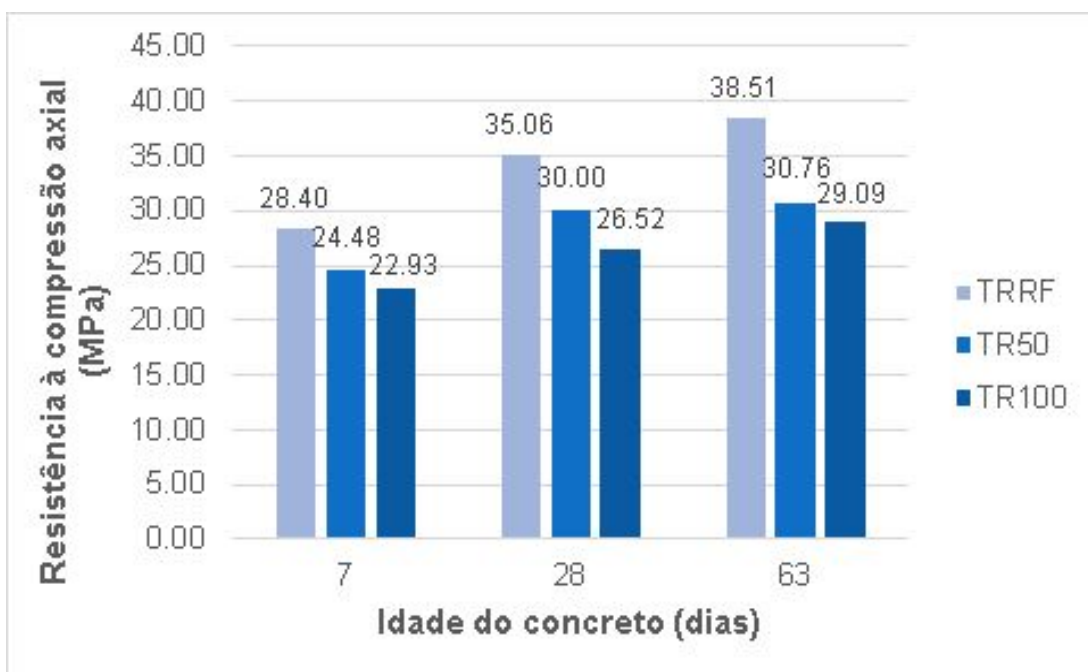
Traço	Resistência à compressão axial (MPa)		
	7 dias	28 dias	63 dias
TRRF	28,40	35,06	38,51
TR50	24,48	30,00	30,76
TR100	22,93	26,52	29,09

Fonte: Autora (2020)

Concretos produzidos com Cimento Portland CP - V - ARI - RS, que é de alta resistência inicial, aos 7 dias atingem resultados próximos às resistências finais.

Nesse caso, todos os traços apresentaram resultados com a tendência de atingir a resistência aos 28 dias, tendo um decréscimo de 19,26% do traço TRRF para o TR100. Aos 28 dias, os 3 traços da classe C25 atingiram a resistência final esperada, porém, a variação dos resultados entre TRRF e TR100 foi maior que aos 7 dias, chegando a reduzir 24,36%. Já aos 63 dias, os rompimentos resultaram em uma redução de 20,12% do traço TRRF para o TR50, e o TR100 uma redução de 24,46% com relação ao traço referência. Essas comparações podem ser visualizadas no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Resistência à compressão da classe C25



Fonte: Autora (2020)

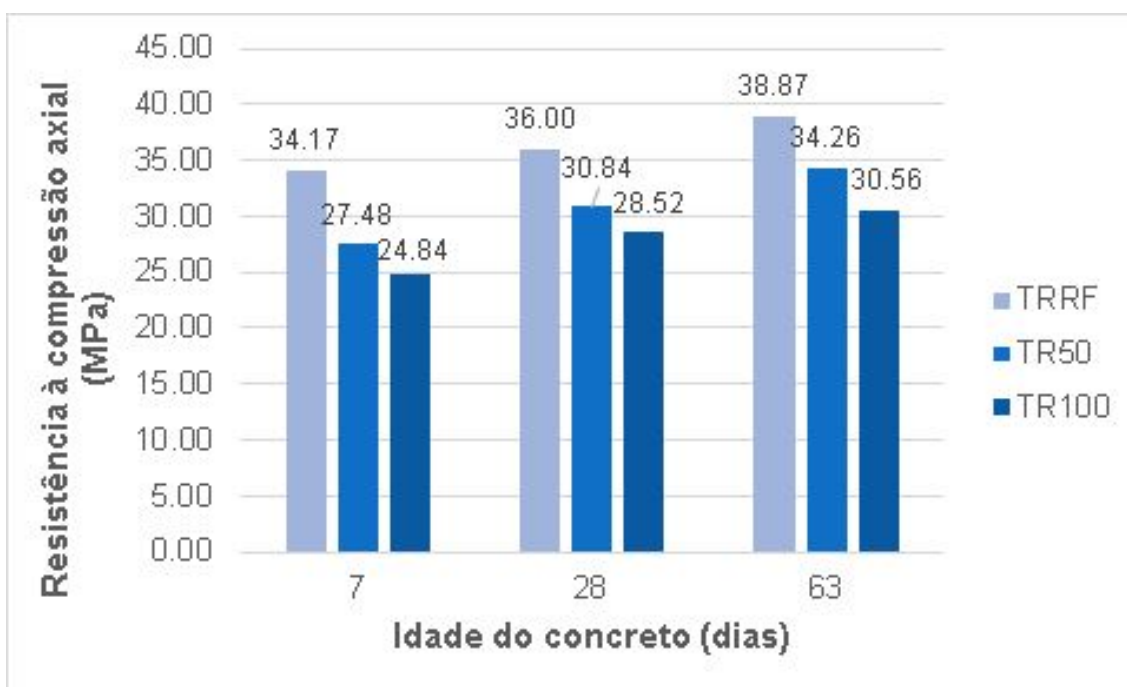
Os resultados de resistência à compressão dos traços de classe C30 estão expostos na Tabela 11, e assim como nos de classe C25, houve uma redução na resistência dos concretos com o aumento dos teores de substituição, conforme mostra o Gráfico 6.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão dos concretos de classe C30

Traço	Resistência à compressão axial (MPa)		
	7 dias	28 dias	63 dias
TRRF	34,17	36,00	38,87
TR50	27,48	30,84	34,26
TR100	24,84	28,52	30,56

Fonte: Autora (2020)

Gráfico 6 - Resistência à compressão da classe C30



Fonte: Autora (2020)

Como nesse caso o cimento utilizado na mistura também foi o Cimento Portland CP V - ARI - RS, aos 7 dias a resistência requerida era próxima da resistência final, sendo que o traço referência ultrapassou este valor e o traço TR50

chegou perto. Em contrapartida, aos 28 dias o traço TR100 não atingiu a resistência final, sendo que reduziu cerca de 21% em comparação ao traço referência. Aos 63 dias, o concreto de traço TR50 e TR100 apresentaram reduções de 11,86% e 21,38%, respectivamente, em comparação ao TRRF.

A dimensão máxima do agregado reciclado e a resistência do concreto de origem podem ter uma parcela significativa nos resultados de resistência à compressão, isso porque a granulometria do agregado reciclado e a resistência dos concretos originais são muito heterogêneas. Agregados com maiores dimensões, são capazes de depositar uma quantidade maior de lâminas de água sob eles, o que resulta em vazios no concreto já endurecido, e esses vazios diminuem a resistência do concreto. Já com relação ao concreto original, quanto maior a resistência deste, maior a resistência do agregado reciclado e consequentemente do novo concreto.

Como fatores de maior influência da resistência à compressão estão a porosidade e a relação a/c. Já que o fator a/c foi mantido para todos os traços da mesma classe de resistência, este não pode ser um influenciador na variação dos resultados, porém, como os valores de *slump* aumentaram com os teores de substituição por causa da pré-molhagem, a quantidade de água presente no concreto pode ter sido um fator redutor na resistência. Já a porosidade, como é uma variante entre os agregados naturais e reciclados, quanto maior o teor de substituição, maior a porcentagem de vazios do concreto, e consequentemente menor a resistência.

Outra questão que reduz a resistência do concreto é a zona de transição presente no agregado reciclado e a que se forma entre o agregado e a pasta do novo concreto. Além de ser um lugar possível de se aprisionar vazios, são pontos de fragilidade que aumentam proporcionalmente aos teores de substituição.

4.2.2 Absorção e índice de vazios

O ensaio realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), determina a quantidade de água que uma amostra de concreto é capaz de absorver em determinado período e a taxa de poros permeáveis em relação ao volume total da

amostra. Os resultados das pesagens foram expostos na Tabela 12, e as taxas de absorção encontradas na Tabela 13.

Tabela 12 - Resultados das pesagens do ensaio de absorção e índice de vazios

Classe de resistência	Traço	Amostra	Massa inicial (g)	Massa em 72 h (g)	Massa em balança hidrostática (g)
C25	TRRF	A	3752,4	4031,9	2368,4
		B	3809,6	4093,5	2411,8
	TR50	A	3506,8	3836,3	2174,9
		B	3355,8	3668,6	2089,3
	TR100	A	3220,9	3611,2	1973,5
		B	3136,5	3519,2	1919,4
C30	TRRF	A	3743,8	4018,0	2363,4
		B	3553,3	3815,2	2245,0
	TR50	A	3496,3	3812,5	2176,2
		B	3537,9	3860,8	2201,6
	TR100	A	3163,3	3535,0	1932,8
		B	3300,3	3694,7	2004,4

Fonte: Autora (2020)

Tabela 13 - Resultados de absorção por imersão

Classe de resistência	Absorção (%)		
	TRRF	TR50	TR100
C25	7,45	9,36	12,16
C30	7,35	9,09	11,85

Fonte: Autora (2020)

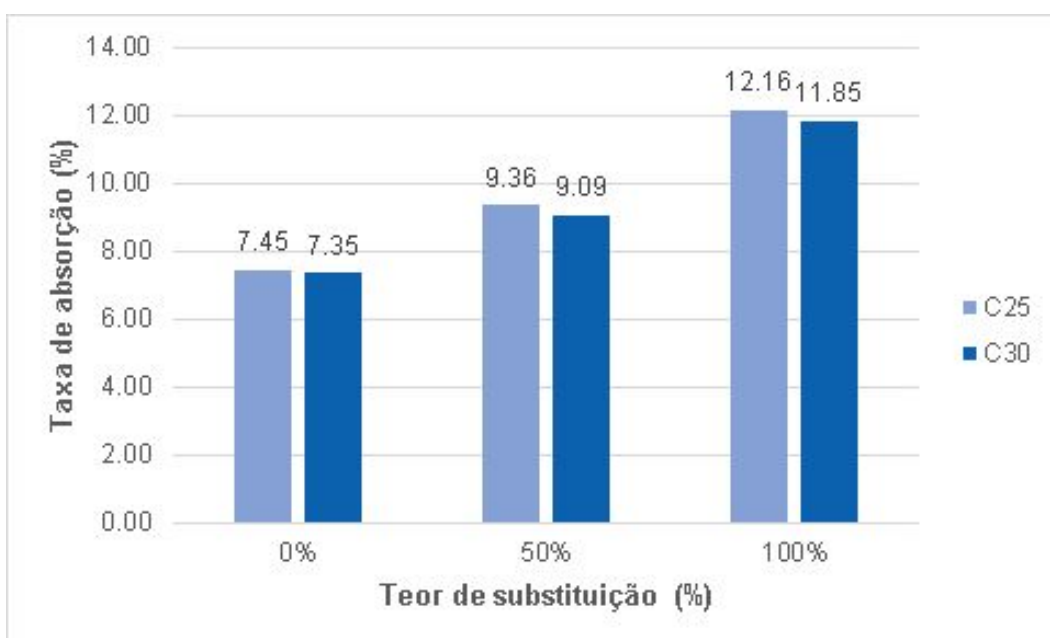
Assim como na bibliografia, a taxa de absorção aumentou proporcionalmente aos teores de substituição nos traços das duas classes de resistência. Enquanto que

nos de classe C25 a taxa de absorção aumentou cerca de 63% do referência para o com 100% de substituição, nos de classe C30 aumentou cerca de 61%.

As taxas de absorção dos concretos de classe C25 são maiores que dos de classe C30, e com isso se percebe que esse parâmetro tem ligação direta com o consumo de cimento. Na dosagem, quando comparamos os traços C25 com os C30, eles possuem menor consumo de cimento, maior quantidade de agregados e maior fator a/c. O aumento do número de agregados graúdos resulta em mais zonas de transição e consequentemente mais microfissuras, aumentando também a taxa de absorção.

O Gráfico 7 apresenta a comparação dos resultados obtidos entre os concretos de classe C25 e C30. Nesse caso, como as classes de resistência são de valores muito próximos, as diferenças entre as taxas de absorção se tornam insignificantes. Contudo, a análise é importante para identificar que, quanto maior o consumo de cimento na dosagem, menores as taxas de absorção. Ainda, mesmo que pequeno, pode-se observar que entre as classes há um aumento nas variações conforme aumentam as substituições.

Gráfico 7 - Absorção por imersão dos concretos de classes C25 e C30



Fonte: Autora (2020)

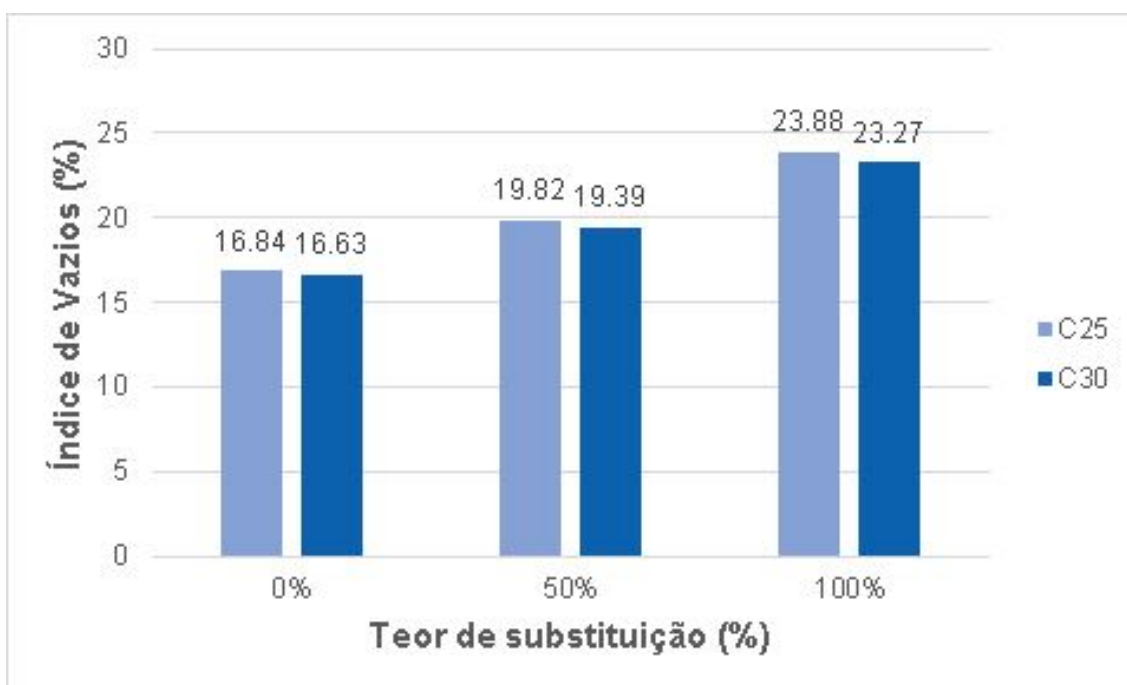
O índice de vazios de uma amostra é determinado com as mesmas variáveis do ensaio de absorção expostas na Tabela 12, regido pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Os resultados encontrados aplicando a equação presente na norma estão expostos na Tabela 14 e no Gráfico 8.

Tabela 14 - Resultados dos índices de vazios

Classe de resistência	Índice de vazios (%)		
	TRRF	TR50	TR100
C25	16,84	19,82	23,88
C30	16,62	19,39	23,27

Fonte: Autora (2020)

Gráfico 8 - Índice de vazios dos concretos de classes C25 e C30



Fonte: Autora (2020)

Mesmo que a diferença entre os traços de classes C25 e C30 seja pequena, conforme aumenta o teor de substituição dos agregados, aumenta também a variação. Enquanto que nos traços TRRF a redução percentual é de apenas 1,25%, nos traços TR100 ela aumenta para 2,55%. Quando comparamos os traços TRRF

com os TR50, o aumento médio do índice de vazios entre as duas classes de resistência é de 17,2%, já para os TR100 o aumento chega a 40,87%.

O índice de vazios pode ser considerado uma variável determinante para os resultados de absorção, pois uma vez que este ensaio relaciona o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, quanto maior o índice de vazios, maior probabilidade da amostra absorver água. Além disso, assim como os concretos de classe C30 absorvem menos água que os de classe C25 em função do consumo de cimento e da quantidade de agregados, o índice de vazios aumenta pelo mesmo motivo.

4.2.3 Absorção de água por capilaridade

Conforme a norma prevê, foram feitas pesagens das amostras com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h para determinar a massa de água que uma amostra é capaz de absorver pela área de sua seção transversal. Os resultados estão expostos na Tabela 15.

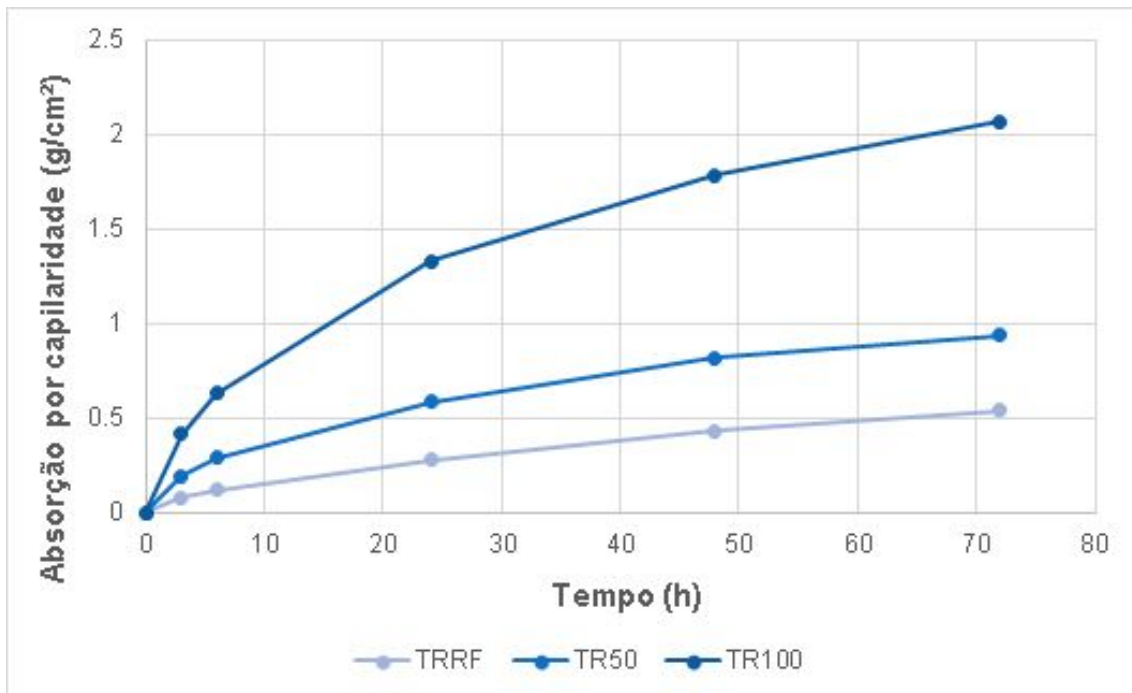
Tabela 15 - Resultados de absorção por capilaridade

Classe de resistência	Traço	Absorção por capilaridade (g/cm ²)				
		3h	6h	24h	48h	72h
C25	TRRF	0,080	0,118	0,278	0,434	0,539
	TR50	0,192	0,290	0,583	0,816	0,936
	TR100	0,416	0,630	1,327	1,785	2,064
C30	TRRF	0,043	0,069	0,160	0,239	0,294
	TR50	0,130	0,182	0,390	0,563	0,654
	TR100	0,160	0,264	0,634	0,893	1,045

Fonte: Autora (2020)

A variação entre os resultados dos concretos de classe C25 ao longo do tempo podem se comparados no Gráfico 9. A absorção de água por capilaridade dos traços com substituição, quando comparados com o traço TRRF apresentaram um aumento de cerca de 74% para o TR50 e quase triplicando o valor para o TR100.

Gráfico 9 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de classe C25

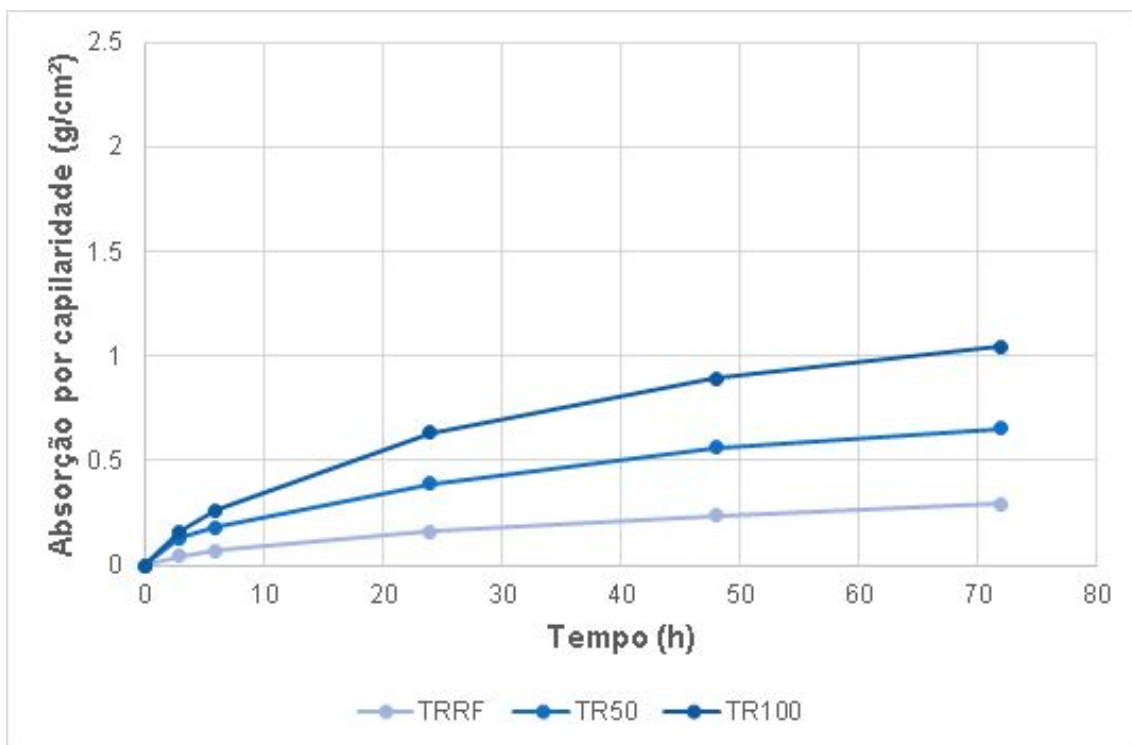


Fonte: Autora (2020)

Os concretos de todos os traços, com o passar das horas absorveram uma quantidade pequena de água, porém, os produzidos com agregado reciclado têm maior capacidade de absorver e armazenar água em seus poros. Era um resultado esperado, uma vez que o próprio AGRC apresentou um aumento significativo na taxa de absorção comparado ao AGN, e as suas propriedades tem grande influência nas do concreto. Complementando, a absorção de água por capilaridade aumenta proporcionalmente com o aumento dos teores de substituição dos agregados.

Assim como nos concretos de classe C25, os de classe C30 também apresentaram aumentos significativos entre os traços sem e os com substituição, como pode ser visualizado no Gráfico 10. Nesse caso, a variação entre os traços TRRF e TR100 atingiu cerca de 350%.

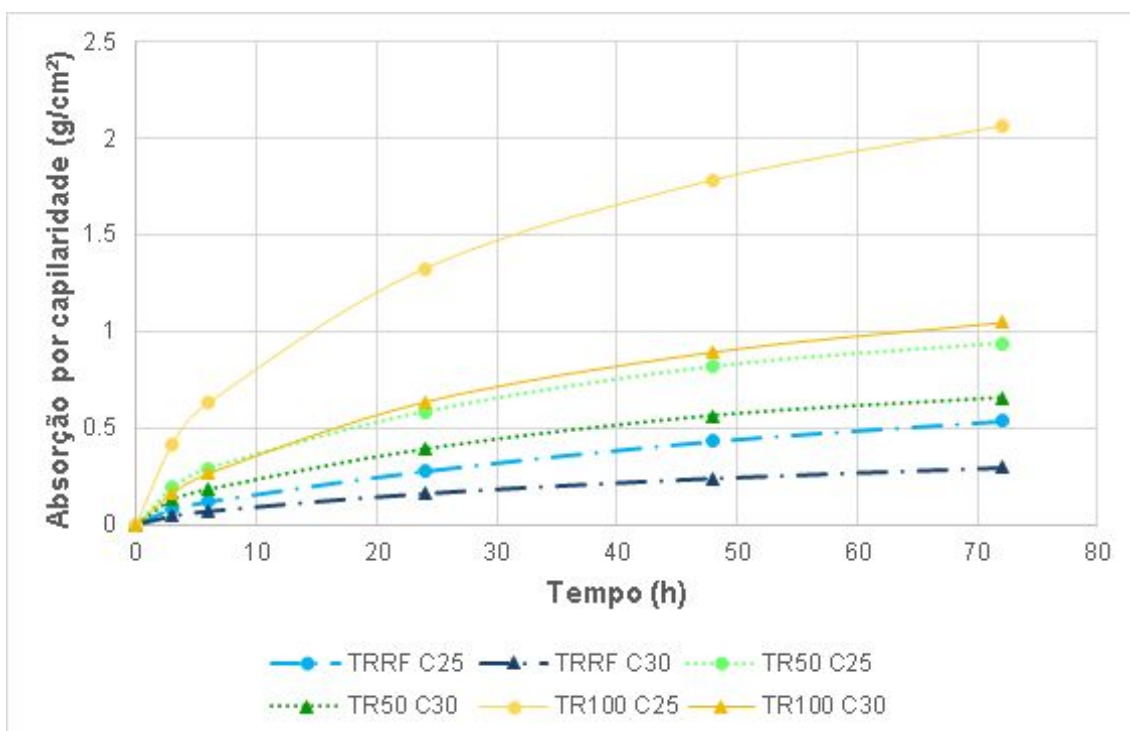
Gráfico 10 - Absorção de água por capilaridade dos concretos de classe C30



Fonte: Autora (2020)

Quando compara-se os concretos por classe de resistência, percebe-se que, independente do traço, os de classe C25 possuem absorções maiores que os de classe C30, conforme mostra o Gráfico 11. Essa variação tem relação direta com a dosagem, pois concretos com maiores teores de cimento, que nesse caso são os de classe C30, conseqüentemente, reduzem a quantidade de agregados. Em função disso, nos traços de classe C30, além do cimento proporcionar maiores resistências, juntamente à menor quantidade de agregados graúdos, reduzem a quantidade de vazios do material, dificultando o transporte ascendente de água pelo concreto.

Gráfico 11 - Comparativo dos resultados de absorção por capilaridade das classes C25 e C30



Fonte: Autora (2020)

Quanto maior o teor de substituição, maior a altura de ascensão capilar. Isso acontece pois os vazios internos dos concretos com substituição aumentam em função da quantidade de argamassa e das zonas de transição presentes nos agregados reciclados e entre eles e a nova pasta do concreto. As distribuições internas dos traços TRRF, TR50 e TR100 dos concretos de classe C30 atingiram 1,9

cm, 5,6 cm e 6,15 cm, respectivamente. Os desenhos da ascensão dos traços TRRF e TR100 podem ser comparados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Ascensão capilar do traço TRRF de classe C30



Fonte: Autora (2020)

Figura 12 - Ascensão capilar do traço TR100 de classe C30



Fonte: Autora (2020)

Nos corpos de prova de classe C25, a ascensão aumentou conforme os teores de substituição, da mesma forma que os de classe C30. Com isso, é possível perceber que, independente do teor de substituição, a ascensão capilar aumenta

significativamente em comparação ao concreto referência. Em estruturas de concreto armado, com cobrimentos usuais variando entre 2 cm e 2,5 cm, provavelmente aquelas executadas com concretos com agregados reciclados, as armaduras sofreriam processos de corrosão mais rapidamente.

4.2.4 Módulo de elasticidade

Assim como o ensaio depende da tensão de ruptura da amostra para processamento, a capacidade de um concreto de se deformar está diretamente relacionada à capacidade deste resistir à esforços de compressão. Os ensaios de módulo de elasticidade, realizados em corpos-de-prova com idade de 28 dias e após ensaio de compressão, apresentaram os resultados expostos na Tabela 16.

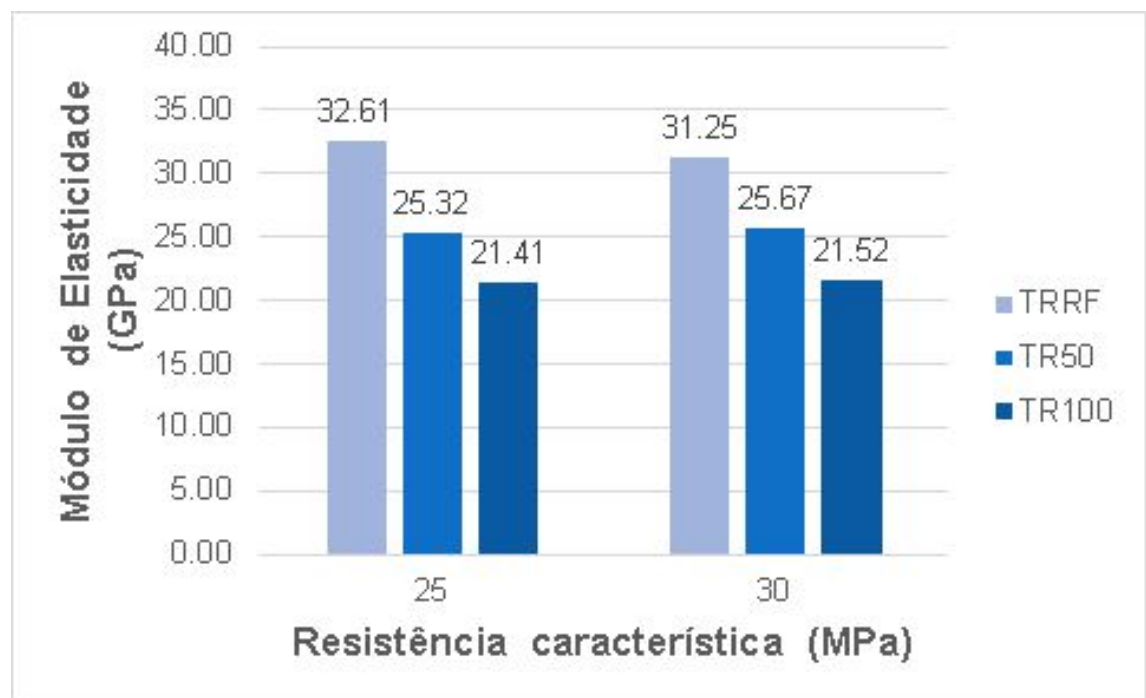
Tabela 16 - Resultados de módulo de elasticidade

Classe de resistência	Módulo de elasticidade (GPa)		
	TRRF	TR50	TR100
C25	32,61	25,32	21,41
C30	31,25	25,67	21,52

Fonte: Autora (2020)

O módulo de elasticidade reduz da mesma forma que os resultados de resistência à compressão diminuem com o aumento dos teores de substituição dos agregados graúdos. Assim sendo, relacionando as classes de resistência, os concretos de classe C25 apresentam módulos de elasticidade menores que os de classe C30, conforme mostra o Gráfico 12.

Gráfico 12 - Módulo de elasticidade dos concretos de classes C25 e C30



Fonte: Autora (2020)

Mehta e Monteiro (2014) relacionaram a porosidade do agregado como o fator mais importante de influência no módulo de elasticidade, isso porque esta determina a rigidez do material e controla a capacidade da matriz de se deformar. Outros fatores relacionados à porosidade estão a interface da zona de transição e a matriz cimentícia, que somam a quantidade de poros do concreto. Desse modo, quanto maior a quantidade de AGRC no novo concreto, menor o módulo de elasticidade.

5 CONCLUSÃO

Nas condições apresentadas neste trabalho, em que foram avaliadas as propriedades físicas dos AGRC e as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com AGRC no estado fresco e endurecido, pôde-se chegar nas conclusões abordadas neste capítulo.

Com base no comparativo entre as propriedades físicas dos agregados graúdos estudados, pôde-se avaliar as variações de resultados entre esses materiais. O AGRC apresenta maior composição de poros quando comparado ao AGN, derivados da argamassa aderida à brita e da zona de transição que fragiliza o agregado. Além disso, possui uma composição mais heterogênea, decorrente da origem e do processo de beneficiamento do material. Essas variantes resultaram no aumento do MF, da DMC e da taxa de absorção, e na redução das massas específica e unitária do AGRC em comparação ao AGN.

A partir da análise dos concretos frescos observou-se uma tendência de redução na massa específica conforme o aumento do teor de substituição do AGN pelo reciclado. Este fator teve influência da massa específica do próprio agregado reciclado, tendo em vista que este apresentou valores menores que o AGN. Outros fatores que influenciaram na massa específica foram a forma e tamanho do agregado graúdo.

Ainda, analisando os concretos frescos, estes em geral deveriam apresentar abatimentos menores quanto maior o teor de AGRC. Ao invés disso, os concretos de traços TR50 e TR100 resultaram em *slumps* superiores aos dos concretos TRRF por consequência da pré-molhagem do AGRC. Este método ajustou a diferença entre as taxas de absorção dos agregados graúdos, mas o aumento da temperatura da mistura provocada pelo cimento e a possível desagregação durante o processo podem ter provocado perda de água do agregado, e esta migrou direto para a pasta. O aumento dos valores de *slump* podem ter influenciado negativamente na resistência dos concretos de traço TR100, já que estes ultrapassaram o *slump* base de 120 ± 20 mm.

Os concretos no estado endurecido apresentaram redução nas resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 63 dias quando comparados os traços sem e com substituição. A porosidade do agregado reciclado e as zonas de transição presentes no AGRC e no novo concreto reduzem a capacidade do concreto de resistir aos esforços de compressão, e essa variação aumenta proporcional aos teores de substituição. A partir da metodologia apresentada neste estudo, foi estipulado que os concretos deveriam atingir a resistência final aos 28 dias. Sendo assim, apenas o traço TR100 de classe C30 não alcançou essa marca, ou seja, no quesito resistência, somente este traço não seria aceito.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, este possui grande influência na deformação em relação ao carregamento. Por isso, as propriedades do AGRC que interviram na resistência dos concretos também tiveram o mesmo efeito no módulo de elasticidade, reduzindo os resultados conforme aumentavam os teores de substituição dos traços. A redução do módulo foi elevada, o que pode ser um fator que inviabiliza a aplicação do concreto com agregado reciclado, necessitando de mais estudos nesta propriedade.

Quanto às propriedades de absorção por imersão e capilaridade, os concretos com substituição se mostraram mais capacitados que os traços referências, independente da classe de resistência. Esta constatação é notável por consequência da quantidade de poros presentes no AGRC, visto que estes aprisionam e

possibilitam o transporte interno de água. Por consequência da porosidade do agregado reciclado, o índice de vazios também aumentou proporcional aos teores de substituição.

Relacionando as propriedades dos traços de concreto por classe de resistência, pode-se observar alternâncias nos valores consequentes da própria dosagem. O maior consumo de cimento, e por consequência menor teor de agregados dos concretos C30, resultaram em menores taxas de absorção, maiores resistências à compressão, módulos de elasticidade e massas específicas quando comparados aos concretos de classe C25. Esses efeitos são decorrentes do menor teor de vazios destes concretos.

Finalizando, os concretos de ambas classes de resistência analisadas apresentaram variações nos resultados entre os traços, ampliadas com o acréscimo dos teores de substituição. Essa alternância, como a redução da resistência e aumento da taxa de absorção, podem afetar na aceitação e na durabilidade do concreto. Apesar de grande parte dos resultados se mostrarem satisfatórios, é necessário ainda avaliar a viabilidade tanto financeira como dos processos executivos para reciclagem e beneficiamento dos resíduos, e para a produção de concretos com estes materiais. Visto o aumento da porosidade, sugere-se ainda a avaliação da influência dos agregados reciclados na durabilidade em estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012. 459 p.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** -Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** - Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522** - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779** - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833** - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004** - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113** - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114** - Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115** - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116** - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1** - Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605** - Cimento Portland e outros materiais em pó. Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26** - Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27** - Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52** - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53** - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67** - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

CABRAL, A. E. B et. al. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. **Revista Minerva - Pesquisa e Tecnologia**. São Carlos/SP, v. 4, nº 1, p. 75-84, jan-jun. 2007.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307 - Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **DOU - Diário Oficial da União**, nº 136, p. 95-96, julho. 2002.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2013. 127 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ESTOLANO, V., et. al. Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Revista Matéria**. v. 23, nº 1, 2018.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: um novo material para dosagens estruturais**. 2001. 147 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1ª ed. Brasília: SENAI, 1992.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 270 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOVATO, Patrícia Silveira. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 2007. 180 p. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MALYSZ, G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado.** 2018. 164 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Microestrutura, propriedades e materiais. 2º ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

TORRES, A.; BURKHART, A. Developing Sustainable High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials and Recycled Concrete. **Materials Sciences and Applications.** San Marcos, TX, USA, 7, 128-137, 29 de fevereiro de 2016.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Revista Ambiente Construído.** Porto Alegre, v. 4, nº. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09